

Patent number: DE69729158T

Publication date: 2005-05-04

Inventor: WESTWATER JONATHAN (JP); GOSAIN DHARAM
PAL (JP); NAKAGOE MIYAKO (JP); USUI SETSUO (JP)

Applicant: SONY CORP (JP)

Classification:

- international: C30B11/00; C30B11/12; C30B25/00; C30B25/04;
H01L21/20; H01L33/00; C30B11/00; C30B25/00;
C30B25/04; H01L21/02; H01L33/00; (IPC1-7):
C30B25/04; H01L21/20; H01L33/00

- european: C30B11/00; C30B11/12; C30B25/00F; C30B25/04;
H01L21/20; H01L33/00C3; H01L33/00G2; Y01N8/00

Application number: DE19976029158T 19971028

Priority number(s): JP19960302512 19961028; JP19960325555 19961205;
JP19970068484 19970321; JP19970256045 19970904

Also published as:



EP0838865 (A2)
US5976957 (A1)
EP0838865 (A3)
EP0838865 (B1)
CN1150631C (C)

Report a data error here

Abstract not available for DE69729158T

Abstract of corresponding document: EP0838865

While a silicon substrate is heated, gold is evaporated thereon at a thickness of 0.6 nm, whereby melted alloy droplets are formed on the substrate surface. Then, the silicon substrate is heated to 450 DEG -650 DEG C in a silane gas atmosphere of less than 0.5 Torr. As a result, a silane gas decomposition reaction occurs with the melted alloy droplets serving as catalysts, whereby silicon wires grow on the substrate surface. Subsequently, the metal alloy droplets at the tips of the silicon wires are removed and surface portions of the silicon wires are oxidized. Resulting surface oxide films are thereafter removed. As a result, silicon quantum wires that are thinner by the thickness of the surface oxide films are obtained.

FIG. 2A

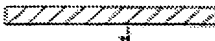


FIG. 2B

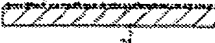


FIG. 2C

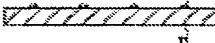
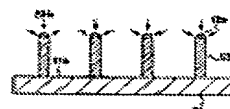


FIG. 2D



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 697 29 158 T2 2005.05.04

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) EP 0 838 865 B1
(21) Deutsches Aktenzeichen: 697 29 158.8
(96) Europäisches Aktenzeichen: 97 118 716.6
(96) Europäischer Anmeldetag: 28.10.1997
(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: 29.04.1998
(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: 19.05.2004
(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: 04.05.2005

(51) Int Cl.⁷: **C30B 25/04**
H01L 21/20, H01L 33/00

(30) Unionspriorität:

30251296	28.10.1996	JP
32555596	05.12.1996	JP
6848497	21.03.1997	JP
25604597	04.09.1997	JP

(73) Patentinhaber:

Sony Corp., Tokio/Tokyo, JP

(74) Vertreter:

Müller - Hoffmann & Partner Patentanwälte, 81667
München

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE, FR, GB

(72) Erfinder:

Westwater, Jonathan, Shinagawa-ku, Tokyo, JP;
Gosain, Dharam Pal, Shinagawa-ku, Tokyo, JP;
Nakagoe, Miyako, Shinagawa-ku, Tokyo, JP; Usui,
Setsuo, Shinagawa-ku, Tokyo, JP

(54) Bezeichnung: Auf einem Substrat hergestellte Quantendrähte und deren Herstellungsverfahren, sowie ein Bauteil mit Quantendrähten auf einem Substrat

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

1. Gebiet der Erfindung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Herstellung eines Drahtes.

2. Beschreibung des Standes der Technik

[0002] Aufgrund von Auswirkungen seiner Nanometer-Größe kann der Quantendraht neuartige physikalische Eigenschaften bereitstellen, die von Volumeneigenschaften verschieden sind. Beispielsweise steigt, wie in Fig. 1 gezeigt, in dem Silizium-(Si)-Quantendraht die Bandlücke an, wenn der Drahtdurchmesser abnimmt. Ferner verändert sich ein Material mit einer Bandlücke mit einem indirekten Übergang in einem Volumenzustand zu einem Material mit einer Bandlücke mit einem direkten Übergang. Als Ergebnis steigt in dem Silizium-Quantendraht der Wirkungsgrad der Lichtemission aufgrund der Elektron-Loch-Rekombination beträchtlich an, und die Emissionswellenlänge wird zu kürzeren Wellenlängen hin verschoben, was die Emission von sichtbarem Licht ermöglicht.

[0003] Der Silizium-Quantendraht, der die vorstehenden physikalischen Eigenschaften bereitstellen kann, wird herkömmlicherweise durch Ätzen eines Siliziumsubstrats durch Elektronenstrahlolithographie oder ein anderes Verfahren hergestellt. Bei diesem Verfahren ist es jedoch schwierig, Silizium-Quantendrähte mit einer gleichen Form über eine große Fläche in einer integrierten Weise herzustellen.

[0004] Hinsichtlich des Vorstehenden ist vorgeschlagen worden, eine Anzahl von Silizium-Quantendrähten direkt auf einem Siliziumsubstrat unter Verwendung eines VLS-(Dampf-Flüssigkeit-Festkörper-)Verfahrens zu wachsen (siehe E. I. Givargizov, J. Vac. Sci. Techno. B11(2), S. 449).

[0005] Bei diesem Verfahren werden, nachdem geschmolzene Legierungströpfchen aus Silizium und Gold auf der Oberfläche eines Siliziumsubstrats durch Aufdampfen von Gold (Au) auf dem Siliziumsubstrat gebildet worden sind, Silizium-Quantendrähte durch Erhitzen des Substrats gewachsen, während ein siliziumhaltiges Gas zugeführt wird (siehe Wagner et al., Appl. Phys. Lett. 4, Nr. 5, Seite 89, 1964, und Givargizov, J. Cryst. Growth, 31, S. 20, 1975).

[0006] Das Dokument EP-A-0 443 920 des Standes der Technik offenbart ein kontrolliertes bzw. geregeltes Wachstum von Silizium-Haarkristallen bzw. -Whiskern auf einem Silizium-(111)-Substrat mit den Schritten zum Abscheiden einer SiO_2 -Schicht, nach-

folgendes Abscheiden einer Schicht aus einem photosensitiven Harz, Belichten und Entwickeln der Harzschicht, so dass Öffnungen gebildet werden, die das SiO_2 freilegen, wobei das freigelegte SiO_2 unter Bildung einer Matrix aus Öffnungen in der SiO_2 -Schicht weggeätzt wird. Eine Schicht aus einem Metall, wie beispielsweise Au oder Ag, mit einer Dicke von 1 nm bis 500 nm wird durch Aufdampfen auf dem Harz und in den Öffnungen abgeschieden, das Harz wird aufgelöst, so dass das Harz und das auf dem Harz sich befindende Metall entfernt werden, wodurch präzise lokalisierte Metallspitzen erhalten werden. Durch Erhitzen des Substrats auf eine Temperatur zwischen 400°C und 1000°C wird die Bildung einer flüssigen Phase aus Au/Si in jeder der Öffnungen erhalten, und unter einer SiH_4/HCl - oder $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{HCl}$ - oder SiCl_4 -Atmosphäre werden Silizium-Whisker gewachsen.

[0007] Ferner wird in dem Dokument US-A-5,544,617 des Standes der Technik ein Verfahren zur Herstellung eines Silizium-Whiskers auf einem einkristallinen Silizium-(111)-Substrat beschrieben, mit den Schritten zur Bildung eines Musters aus einer Gold-Metallschicht auf dem Substrat durch Fotolithographie, Ätzen und Plattieren, Ätzen der Oberfläche des einkristallinen Substrats und um das Metallschichtmuster herum und Wachsen des Silizium-Whiskers durch Erhitzen des Substrats in einer Gasatmosphäre, die ein siliziumhaltiges Gas enthält.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0008] Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren zur Herstellung von Quantendrähten bereitzustellen, die einen kleinen Durchmesser haben und daher ausreichende Quanteneffekte bereitstellen können.

[0009] Zur Lösung dieser Aufgabe stellt die vorliegende Erfindung ein Herstellungsverfahren wie in Anspruch 1 ausgeführt bereit.

[0010] Bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung sind in den Unteransprüchen beschrieben.

[0011] Ein Verfahren zur Herstellung eines Quantendrahtes umfasst die Schritte zum Aufdampfen eines Metalls auf ein Siliziumsubstrat, wobei das Metall als ein Katalysator in einer Zersetzungsreaktion eines siliziumhaltigen Gases dient, Wachsen eines Siliziumdrahtes auf einer Oberfläche des Siliziumsubstrats durch Erhitzen des Siliziumsubstrats, auf der das Metall aufgedampft ist, in einer Atmosphäre, die das siliziumhaltige Gas enthält, und dadurch Zersetzen des siliziumhaltigen Gases, wobei das Metall als ein Katalysator dient, Oxidieren des somit gewachsenen Siliziumdrahtes unter Bildung eines Oxidfilms in einem Oberflächenbereich, Entfernen des Metalls an einer Spitze des Siliziumdrahtes und Entfernen des

Oxidfilms.

[0012] Ein weiteres Verfahren zur Herstellung eines Quantendrahtes umfasst die Schritte zum Aufdampfen eines Metalls, das einen geschmolzenen Legierungstropfen mit Silizium bildet, auf einem Siliziumsubstrat, und Wachsen, nach dem Aufdampfschritt, eines Silizium-Quantendrahts durch Erhitzen des Siliziumsubstrats auf 400°C oder weniger in einer Atmosphäre, die ein siliziumhaltiges Gas bei 66,66 Pa (0,5 Torr) oder mehr enthält, welches Silizium durch eine Zersetzungsreaktion erzeugt und das bei 400°C oder weniger eine negative Änderung der Gibbs'schen freien Energie bei der Zersetzungsreaktion haben kann.

[0013] In einer Vorrichtung mit einer Vielzahl von Drähten auf einem Substrat sind die Herstellungspeditionen der jeweiligen aus der Vielzahl von Drähten gesteuert.

[0014] Ein weiteres Verfahren zur Herstellung eines Drahtes umfasst die Schritte zum Bilden einer Maske mit einer Öffnung auf einem Substrat, Aufdampfen eines Metalls, wobei das Metall während des Wachstums eines Drahtes auf dem Substrat, auf dem die Maske gebildet ist, zu einem Katalysator wird, und Wachsen eines Drahtes in der Öffnung auf dem Substrat durch Erhitzen des Substrats, auf dem das Metall aufgedampft ist, in einer Atmosphäre, die ein Materialgas für den Draht enthält.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0015] Fig. 1 zeigt eine Beziehung zwischen dem Durchmesser eines Silizium-Quantendrahtes und der Bandlücke;

[0016] Fig. 2A–Fig. 2D sind Querschnittsansichten, die die jeweiligen Schritte der Herstellungsverfahren eines Quantendrahts gemäß einer ersten und zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigen;

[0017] Fig. 3A–Fig. 3C sind Querschnittsansichten, die die jeweiligen Schritte, die dem Schritt von Fig. 2D nachfolgen, zeigen;

[0018] Fig. 4 ist eine REM-Fotografie von Siliziumdrähten, die durch das Verfahren gemäß der ersten Ausführungsform der Erfindung gewachsen sind;

[0019] Fig. 5A und Fig. 5B sind TEM-Fotografien von Silizium-Quantendrähnen, die durch das Verfahren gemäß der ersten Ausführungsform der Erfindung gebildet worden sind;

[0020] Fig. 6 ist eine graphische Darstellung, die eine Beziehung zwischen der Temperatur und der Änderung der Gibbs'schen freien Energie der Zerset-

zungsreaktionen von Silan und Siliziumchlorid zeigen;

[0021] Fig. 7 zeigt Variationen im chemischen Potenzial bei VLS-Reaktionen;

[0022] Fig. 8 ist ein Korrelationsdiagramm, das die Ergebnisse von REM-Untersuchungen von Silizium-Quantendrähnen zeigt, die gewachsen wurden, während der Druck eines Silangases und die Heiztemperatur in einem Beispiel der zweiten Ausführungsform variiert wurden;

[0023] Fig. 9 ist eine perspektivische Ansicht, die die Konfiguration einer Vorrichtung mit Drähten gemäß einer dritten Ausführungsform der Erfindung zeigt.

[0024] Fig. 10 ist eine perspektivische Ansicht, die eine Modifikation der Vorrichtung von Fig. 9 zeigt;

[0025] Fig. 11 ist eine Querschnittsansicht, die eine weitere Modifikation der Vorrichtung von Fig. 8 zeigt;

[0026] Fig. 12A–Fig. 12C sind Querschnittsansichten, die die jeweiligen Schritte eines Herstellungsverfahrens der Vorrichtung von Fig. 10 zeigen;

[0027] Fig. 13A–Fig. 13D sind Querschnittsansichten, die die jeweiligen Schritte nach dem Schritt von Fig. 12C zeigen;

[0028] Fig. 14A–Fig. 14E sind Querschnittsansichten, die die jeweiligen Schritte eines weiteren Verfahrens zur Herstellung der Vorrichtung von Fig. 10 zeigen;

[0029] Fig. 15A–Fig. 15C sind Querschnittsansichten, die die jeweiligen Schritte nach den Schritten von Fig. 14E zeigen;

[0030] Fig. 16 ist eine Draufsicht, die den Fig. 14B und Fig. 14E entspricht; und

[0031] Fig. 17 ist eine REM-Fotografie, die Zustände der jeweiligen Drähte einer Vorrichtung zeigt, die durch das Herstellungsverfahren, das in den Fig. 14A bis Fig. 14E und Fig. 15A bis Fig. 15C gezeigt ist, hergestellt worden ist.

BESCHREIBUNG DER BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSFORMEN

[0032] Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung werden nachstehend im Detail unter Bezugnahme auf die begleitenden Zeichnungen beschrieben.

Ausführungsform 1

[0033] Die Fig. 2A bis Fig. 2D und Fig. 3A bis

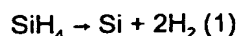
Fig. 3C zeigen ein Verfahren zur Herstellung eines Quantendrahts gemäß einer ersten Ausführungsform der Erfindung. Bei dieser Ausführungsform wird zuerst, wie in **Fig. 2A** gezeigt, ein (111)-Silizium-(Si)-Substrat 11 mit beispielsweise einer Resistivität von 0,4 bis 4 $\Omega \cdot \text{cm}$, in einen Vakuumbehälter (nicht gezeigt) eingeschoben, und seine Oberfläche wird beispielsweise durch Erhitzen bei 1000°C und $6,666 \times 10^{-6}$ Pa (5×10^8 Torr) gereinigt.

[0034] Dann wird, wie in **Fig. 2B** gezeigt, während das Siliziumsubstrat 11 auf 450°C oder mehr erhitzt wird, Gold (Au) 12, wobei das Gold als ein Katalysator in einer Zersetzungsreaktion eines siliziumhaltigen Gases dient, auf die Oberfläche des Siliziumsubstrats 11 bei einer Dicke von beispielsweise 0,6 nm aufgedampft (Aufdampfschritt). Beispielsweise wird das Siliziumsubstrat 11 vorzugsweise bei 450 bis 650°C erhitzt, indem man einen Gleichstrom durch das Siliziumsubstrat 11 entlang seiner Längsrichtung fließen lässt. Beispielsweise wird Gold 12 unter Verwendung eines Wolfram-(W)-Glüh- bzw. -Heizfadens verdampft. Als ein Ergebnis schmilzt das Gold 12 lokal Silizium an der Oberfläche des Siliziumsubstrats 11 und klebt aneinander bzw. hängt zusammen, wobei geschmolzene Legierungströpfchen 12a gebildet werden, wie in **Fig. 2C** gezeigt.

[0035] Der Grund, warum die Aufdampfdicke von Gold 12 in dem Aufdampfschritt nur 0,6 nm beträgt, ist, um die geschmolzenen Legierungströpfchen 12a kleiner zu machen, wodurch die Siliziumdrähte 13, die in einem späteren Draht-Wachstumsschritt gewachsen werden (siehe **Fig. 2D**), dünner gemacht werden.

[0036] Danach wird, wie in **Fig. 2D** gezeigt, während das Siliziumsubstrat 11 auf 450°C oder mehr (vorzugsweise 450°C bis 650°C) erhitzt wird, beispielsweise ein Silan-(SiH₄-)Gas als ein siliziumhaltiges Gas, in den Vakuumbehälter (nicht gezeigt) eingeleitet (Drahtwachstumsschritt). Die Menge des einzuleitenden Silangases wird so eingestellt, dass der Druck des Silangases in dem Vakuumbehälter (nicht gezeigt) beispielsweise niedriger als 66,66 Pa (0,5 Torr) wird (vorzugsweise niedriger als 20 Pa (0,15 Torr)).

[0037] Als Ergebnis wird das Silangas durch eine Zersetzungsreaktion, die in Formel (1) gezeigt ist, unter Bildung von Silizium zersetzt, wobei die geschmolzenen Legierungströpfchen 12a als ein Katalysator dienen. Die Zersetzungsreaktion des Silangases tritt nicht auf einer Oberfläche 11a des Siliziumsubstrats 11 auf, an der die geschmolzenen Legierungströpfchen 12a nicht vorliegen.



[0038] Silizium, das durch die Zersetzung des Silan-

gases gebildet worden ist, diffundiert in die geschmolzenen Legierungströpfchen 12a und bindet sich epitaxial an die Grenzfläche zwischen den geschmolzenen Legierungströpfchen 12a und dem Siliziumsubstrat 11. Als ein Ergebnis wachsen, wie in **Fig. 2D** gezeigt, Siliziumdrähte 13 mit einem Durchmesser von ungefähr 10 bis 100 nm auf dem Siliziumsubstrat 11. Die Dicke der Siliziumdrähte 13 wird durch den Durchmesser der geschmolzenen Legierungströpfchen 12a bestimmt.

[0039] **Fig. 4** ist eine REM-Fotografie (Rasterelektronenmikroskop) eines Beispiels von Siliziumdrähten 13, die in der vorstehend beschriebenen Weise gewachsen worden sind. Diese Fotografie wurde schräg von oberhalb des Siliziumsubstrats 11 aufgenommen. Die Siliziumdrähte 13 wurden ungefähr eine Stunde lang bei einer Heiztemperatur von 500°C und bei einem Silan-Gasdruck von 1,333 Pa (10 mTorr) gewachsen. Somit werden die Silandrähte mit einem Durchmesser von ungefähr 100 nm annähernd senkrecht zu dem Siliziumsubstrat 11 gewachsen.

[0040] Der Grund, warum ein Silangas als das siliziumhaltige Gas bei dem Schritt zum Wachsen des Drahts verwendet wird, ist, dass ein Silangas das Wachstum von Siliziumdrähten 13 mit einem gleichförmigen Dickenprofil in der Längsrichtung (siehe **Fig. 4**) ebenso wie einem ausreichend kleinen Durchmesser zulässt.

[0041] Durch Einstellen der Heiztemperatur des Siliziumsubstrats 11 und des Silan-Gasdrucks auf 450°C oder mehr bzw. niedriger als 66,66 Pa (0,5 Torr) bei dem Draht-Wachstumsschritt, wachsen die Siliziumdrähte 13 senkrecht zu dem Siliziumsubstrat 11, so dass Siliziumdrähte 13 mit der guten Form, wie in **Fig. 4** gezeigt, erhalten werden können.

[0042] Ferner können durch Einstellen der Heiztemperatur des Siliziumsubstrats 11 auf vorzugsweise 650°C oder weniger bei dem Draht-Wachstumsschritt die Siliziumdrähte 13 bei einem ausreichend kleinen Durchmesser gebildet werden.

[0043] Nachdem die Siliziumdrähte 13 in der vorstehend beschriebenen Weise gewachsen sind, werden sie in Königswasser (HNO₃ : HCl = 1 : 3) bei 35°C eine Minute lang eingetaucht, wobei die Legierungströpfchen (d. h., Gold, welches auf die Oberfläche des Siliziumsubstrats 11 aufgedampft worden ist) an den Spitzen der Siliziumdrähte 13 geätzt und entfernt werden, wie in **Fig. 3A** gezeigt (Metallentfernungsschritt). Als Ergebnis wird ein Zustand erreicht, bei dem nur die Siliziumdrähte 13 auf der Oberfläche des Siliziumsubstrats 11 verbleiben.

[0044] Darauf folgend wird, wie in **Fig. 3B** gezeigt, das Siliziumsubstrat 11, auf dem die Siliziumdrähte

13 gewachsen sind, eine geeignete Zeit lang auf 700°C in einer Atmosphäre erhitzt, die ein Sauerstoff-(O₂-)Gas (Sauerstoffgasdruck: beispielsweise 66660 Pa (500 Torr)) enthält (Oxidationsschritt). Als Ergebnis werden die Oxidfilme **13a** und **11b** in den Oberflächenbereichen der Siliziumdrähte **13** und dem Siliziumsubstrat **11** gebildet, und Silizium-Quantendrähte **13b**, deren Durchmesser um die Dicke der Oxidfilme **13a** gegenüber dem Durchmesser der Siliziumdrähte **13** reduziert ist, beispielsweise weniger als 10 nm beträgt, werden in den Zentralbereichen der entsprechenden Siliziumdrähte **13** gebildet.

[0045] Nach der Oxidation der Siliziumdrähte **13**, wird, wie in **Fig. 3C** gezeigt, das Substrat bei Zimmertemperatur 1 Minute lang in HF (50%) eingetaucht, wodurch die Oxidfilme **13a** und **11b** in den Oberflächenbereichen der Siliziumdrähte **13** und des Siliziumsubstrats **11** geätzt und entfernt werden (Oxidfilm-Entfernungsschritt). Als Ergebnis wird ein Zustand erhalten, in dem nur die Silizium-Quantendrähte **13b** auf der Oberfläche des Siliziumsubstrats **11** verbleiben. Somit werden die Silizium-Quantendrähte **13b** mit einem ausreichend kleinen Durchmesser erhalten.

[0046] Die **Fig. 5A** und **Fig. 5B** sind TEM-Fotografien (Transmissionselektronenmikroskop) eines Beispiels eines Silizium-Quantendrahtes **13b**. **Fig. 5A** ist ein TEM-Hellfeldbild eines Siliziumdrahtes **13**, bevor dieser oxidiert wird, und **Fig. 5B** ist eine TEM-Dunkelfeldbild eines Silizium-Quantendrahtes **13b** (Si-Kernbereich), der nach dem Oxidationsschritt erhalten worden ist. Der Silizium-Quantendraht **13b** wurde durch einstündiges Erhitzen eines Siliziumdrahtes **13** mit ungefähr 25 nm Durchmesser bei 700°C in einer Sauerstoffgasatmosphäre von 66660 Pa (500 Torr) gebildet. Somit wurde der Silizium-Quantendraht **13b**, der einen Durchmesser von ungefähr 15 nm und eine gute Form hat, gebildet.

[0047] Wie vorstehend beschrieben, werden bei dem Herstellungsverfahren eines Quantendrahts gemäß der ersten Ausführungsform geschmolzene Legierungströpfchen **12a** auf der Oberfläche eines Siliziumsubstrats **11** gebildet, dann werden Siliziumdrähte **13** auf dem Siliziumsubstrat **11** durch Zersetzen eines siliziumhaltigen Gases gewachsen, wobei die geschmolzenen Legierungströpfchen **12a** als Katalysator verwendet werden, und schließlich werden die Oberflächenbereiche der Siliziumdrähte **13** oxidiert. Daher werden Silizium-Quantendrähte **13b**, die einen ausreichend kleinen Durchmesser haben und daher ausreichende Quanteneffekte bereitstellen können, gebildet.

[0048] Ferner können bei diesem Verfahren zur Herstellung eines Quantendrahts, da Gold **12** bei einer so kleinen Dicke wie 0,6 nm aufgedampft wird, die geschmolzenen Legierungströpfchen **12a** klein

gemacht werden, was das Wachstum von Siliziumdrähten **13** mit einem ausreichend kleinen Durchmesser zulässt. Das heißt, Silizium-Quantendrähte **13b** mit einem kleinen Durchmesser können gebildet werden.

[0049] Weiterhin können bei diesem Verfahren zur Herstellung eines Quantendrahts, da Silangas als ein siliziumhaltiges Gas bei dem Schritt zum Wachsen des Drahtes verwendet wird, Siliziumdrähte **13** mit einem ausreichend kleinen Durchmesser und einem gleichförmigen Dickenprofil in der Längsrichtung gewachsen werden. Das heißt, Silizium-Quantendrähte **13b** mit einem kleinen Durchmesser und einer guten Form können erhalten werden.

[0050] Zusätzlich können bei diesem Verfahren zur Herstellung eines Quantendrahts, da das Substrat in dem Drahtwachstumsschritt auf 450°C oder mehr in einer Silan-Gasatmosphäre mit weniger als 66,66 Pa (0,5 Torr) erhitzt wird, Siliziumdrähte **13** annähernd senkrecht zu einem Siliziumsubstrat **11** gewachsen werden. Das heißt, Silizium-Quantendrähte **13b** mit einer guten Form können erhalten werden.

[0051] Die Erfindung ist nicht auf die vorstehend beschriebene erste Ausführungsform beschränkt, und zahlreiche Modifikationen sind möglich. Beispielsweise wird in der Ausführungsform Gold **12** bei dem Aufdampfschritt aufgedampft, während das Siliziumsubstrat **11** erhitzt wird, und die geschmolzenen Legierungströpfchen **12a** werden während des Aufdampfvorgangs auf der Oberfläche des Siliziumsubstrats gebildet. Alternativ können geschmolzene Legierungströpfchen **12a** durch Erhitzen des Substrats in einer silangashaltigen Atmosphäre, nachdem Gold **12** auf das Siliziumsubstrat **11** aufgedampft worden ist, gebildet werden. Als eine weitere Alternative können geschmolzene Legierungströpfchen **12a** durch Aufdampfen von Gold **12** auf das Siliziumsubstrat und dann Erhitzen des Substrats vor der Einleitung eines Silangases gebildet werden.

[0052] Ferner wird in der ersten Ausführungsform bei dem Aufdampfschritt Gold **12** in einer Dicke von 0,6 nm auf die Oberfläche des Siliziumsubstrats **11** aufgedampft, so dass die Größe der geschmolzenen Legierungströpfchen **12a** klein gemacht wird. Die Größe der geschmolzenen Legierungströpfchen **12a** kann ausreichend klein gemacht werden, d. h., gleich bleibend mit der Größe in der Ausführungsform, solange die Dicke des Golds **12** 5 nm oder weniger beträgt.

[0053] Ferner können, obwohl in der ersten Ausführungsform Gold **12** als das Metall, welches als ein Katalysator bei der Zersetzungsreaktion eines siliziumhaltigen Gases in dem Aufdampfschritt verwendet wird, Platin (Pt), Silber (Ag), Zinn (Sn) und dergleichen anstelle von Gold **12** verwendet werden. Auch

schmilzt in solch einem Fall, wie in dem Fall von Gold 12, das Element, wenn es erhitzt wird, lokal Silizium, und hängt zusammen bzw. klebt aneinander, wobei geschmolzene Legierungströpfchen auf der Oberfläche des Siliziumsubstrats 11 gebildet werden. Ferner können die vorstehend genannten Metallelemente, wenn sie bei einer Dicke von 5 nm oder weniger aufgedampft werden, wie Gold (d. h. wie in der Ausführungsform) ausreichend kleine geschmolzene Legierungströpfchen bilden.

[0054] Zusätzlich kann, obwohl in der ersten Ausführungsform ein Silangas direkt in den Vakuumbehälter (nicht gezeigt) in dem Draht-Wachstumsschritt eingeleitet wird, ein Silangas in den Vakuumbehälter eingeleitet werden, nachdem es mit einem Inertgas, wie beispielsweise Helium-(He-)Gas oder einem Argon-(Ar-)Gas verdünnt worden ist.

[0055] Ferner kann, obwohl in der ersten Ausführungsform ein Silangas als das silanhaltige Gas bei dem Draht-Wachstumsschritt verwendet wird, ein Disilan-(Si_2H_6 -)Gas oder ein Trisilan-(Si_3H_8 -)Gas oder sogar ein Gasgemisch aus mindestens zwei Gasen, ausgewählt aus einem Silangas, einem Disilangas, und einem Trisilangas, anstelle eines Silangases verwendet werden. Selbst mit solch einem Gas außer einem Silangas können Siliziumdrähte mit einem ausreichend kleinen Durchmesser und einer guten Form unter denselben Bedingungen wie mit einem Silangas gewachsen werden.

[0056] Zusätzlich kann nicht nur ein Silangas, ein Disilangas und ein Trisilangas, sondern es können auch Gase mit der Eigenschaft, Silizium durch eine Zersetzungsreaktion zu erzeugen, wie beispielsweise ein Siliziumchlorid-(SiCl_4 -)Gas, das mit einem Wasserstoff-(H_2 -)Gas verdünnt ist, als das siliziumhaltige Gas verwendet werden. In diesem Fall werden der Gasdruck und die Heiztemperatur geeignet für die Art des verwendeten Gases bestimmt.

[0057] Ferner werden in der ersten Ausführungsform die Legierungströpfchen 12a nach dem Draht-Wachstumsschritt, bei dem die Siliziumdrähte 13 gewachsen werden, entfernt, und dann werden die Siliziumdrähte 13 oxidiert. Alternativ können die Siliziumdrähte 13 nach dem Draht-Wachstumsschritt oxidiert werden, wobei nachfolgend die Legierungströpfchen 12a entfernt werden. In diesem Fall können entweder die Verbindungslegierungströpfchen 12a oder die Oxidbereiche 13a zuerst entfernt werden.

[0058] Weiterhin werden gemäß der ersten Ausführungsform bei dem Oxidationsschritt beispielsweise die Siliziumdrähte 13 auf 700°C einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre mit einem Sauerstoffgasdruck von 66 660 Pa (500 Torr) erhitzt. Die Oxidationsbedingungen werden geeignet entsprechend der Dicke der Siliziumdrähte 13 bestimmt.

[0059] Wie vorstehend beschrieben, wird bei dem Verfahren zur Herstellung eines Quantendrahts gemäß der ersten Ausführungsform ein Metall, das als ein Katalysator wirkt, auf einem Siliziumsubstrat aufgedampft, dann werden Siliziumdrähte auf dem Siliziumsubstrat gewachsen, und schließlich werden die Oberflächenbereiche der Siliziumdrähte oxidiert. Daher können Silizium-Quantendrahte mit einem ausreichend kleinen Durchmesser gebildet werden. Somit hat die Erfindung den Vorteil, dass ausreichende Quanteneffekte erhalten werden können.

Ausführungsform 2

[0060] Eine zweite Ausführungsform der Erfindung wird nachstehend im Detail unter Bezugnahme auf die Zeichnungen beschrieben.

[0061] Ein Verfahren zur Herstellung eines Quantendrahts gemäß der zweiten Ausführungsform wird auch unter Bezugnahme auf die Fig. 2A bis Fig. 2D beschrieben. Bei dieser Ausführungsform wird, wie in Fig. 2A gezeigt, zuerst ein Siliziumsubstrat gereinigt, wobei ein Oxid von der Oberfläche entfernt wird.

[0062] Dann wird, wie in Fig. 2B gezeigt, das Substrat 11 in eine Reaktionskammer (nicht gezeigt) eingeschoben. In einem Zustand mit niedrigem Druck wird ein Metall zur Bildung geschmolzener Legierungströpfchen mit Silizium auf die Oberfläche des Siliziumsubstrats 11 aufgedampft, wobei eine Metallschicht 12 gebildet wird (Aufdampfschritt). Beispiele für das Metall zur Bildung geschmolzener Legierungströpfchen mit Silizium umfassen Gold, Silber (Ag) und Indium (In); es ist bevorzugt, die Metallschicht 12 durch Verdampfen mindestens eines dieser Metalle zu bilden. Es ist bevorzugt, dass die Dicke der Metallschicht 5 nm oder weniger beträgt. Dadurch werden kleine geschmolzene Legierungströpfchen 12a (siehe Fig. 2C) in einem späteren Wachstumsschritt (später beschrieben) gebildet.

[0063] Dann wird, nachdem das Siliziumsubstrat 11 auf 400°C oder weniger erhitzt ist, ein siliziumhaltiges Gas in die Reaktionskammer (nicht gezeigt) eingeleitet, während die Temperatur beibehalten wird (Wachstumsschritt). Das siliziumhaltige Gas ist zur Bildung von Silizium durch eine Zersetzungsreaktion vorgesehen. Der Druck des siliziumhaltigen Gases ist auf 66,66 Pa (0,5 Torr) oder mehr eingestellt. Als Ergebnis schmilzt, wie in Fig. 2C gezeigt, die Metallschicht 12 auf der Oberfläche des Siliziumsubstrats 11 lokal Silizium und klebt aneinander bzw. hängt zusammen, wobei eine Vielzahl von geschmolzenen Legierungströpfchen 12a aus Silizium und dem Metall gebildet werden. Die geschmolzenen Legierungströpfchen 12a dienen als Katalysatoren bei der Zersetzungsreaktion des siliziumhaltigen Gases, und die Zersetzungsreaktion des siliziumhaltigen Gases tritt selektiv in den geschmolzenen Legierungströpfchen

12a auf. Das heißt, die Zersetzungsreaktion des siliziumhaltigen Gases tritt auf einer Oberfläche 11a des Siliziumsubstrats 11, an der die geschmolzenen Legierungströpfchen 12a nicht vorliegen, nicht auf.

[0064] Durch die Zersetzungsreaktion des siliziumhaltigen Gases erzeugtes Silizium diffundiert in die geschmolzenen Legierungströpfchen 12a und bindet sich epitaxial an das Siliziumsubstrat 11 an der Grenzfläche zwischen den entsprechenden geschmolzenen Legierungströpfchen 12a und dem Siliziumsubstrat 11. Als Ergebnis werden, wie in Fig. 2D gezeigt, eine Vielzahl von Silizium-Quantendrähten 13, deren Durchmesser kleiner als 20 nm ist, in dem Siliziumsubstrat 11 gewachsen. Der Durchmesser eines jeden Silizium-Quantendrahts 13 ist durch den Durchmesser des entsprechenden geschmolzenen Legierungströpfchens 12a bestimmt.

[0065] Bei dem vorstehend beschriebenen Schritt ist es bevorzugt, dass das siliziumhaltige Gas eines ist, bei dem eine Änderung (ΔG) der Gibbs'schen freien Energie bei seiner Zersetzungsreaktion klein ist. Insbesondere ist es, da bei diesem Schritt die Zersetzungsreaktion bei einer so niedrigen Temperatur wie 400°C oder weniger verursacht wird, bevorzugt, dass ein siliziumhaltiges Gas bei seiner Zersetzungsreaktion bei einer so niedrigen Temperatur von 400°C oder weniger eine negative Änderung in der Gibbs'schen freien Energie hat. Das heißt, es reicht, dass eine Änderung der Gibbs'schen freien Energie der Zersetzungsreaktion bei einer bestimmten Temperatur im Bereich von 400°C oder weniger einen negativen Wert annimmt.

[0066] Beispielsweise hat, wie in Fig. 6 gezeigt, im Fall des Silan-(SiH_4 -)Gases, die Änderung der Gibbs'schen freien Energie der Zusammensetzungsreaktion in einem Bereich von einer hohen Temperatur bis zu der niedrigen Temperatur (400°C oder weniger) einen positiven Wert (negativer Wert im Fall der Zersetzungsreaktion). Daher wird das Silangas bei einer niedrigen Temperatur von 400°C oder weniger leicht zersetzt und ist daher für den beabsichtigten Gebrauch geeignet. Andererseits hat bei dem herkömmlich verwendeten Siliziumchlorid-Gas die Änderung der Gibbs'schen freien Energie der Zusammensetzungsreaktion selbst bei einer hohen Temperatur von ungefähr 1000°C einen negativen Wert (positiver Wert im Fall der Zersetzungsreaktion); es ist für den beabsichtigten Gebrauch nicht geeignet. Obwohl nicht in Fig. 2 gezeigt, haben das Disilan-(Si_2H_6 -)Gas und das Trisilan-(SiH_3H -)Gas negative Änderungen der Gibbs'schen freien Energie bei ihren Zersetzungsreaktionen bei 400°C oder weniger, und daher sind sie auch für den beabsichtigten Gebrauch geeignet. Eine Gasmischung aus mindestens zwei der Gase Silangas, Disilangas und Trisilangas können als siliziumhaltiges Gas verwendet werden.

[0067] Wie in Fig. 7 für das Beispiel Silangas gezeigt, hat eine Substanz mit einer kleinen Änderung der Gibbs'schen Energie in einer Zersetzungsreaktion ein relativ hohes chemisches Potenzial. Daher lässt, obwohl das chemische Potenzial eines Siliziumdrahtes mit abnehmendem Durchmesser ansteigt, das Siliziumgas das Wachstum von sogar Silizium-Quantendrähten 13 mit einem kleinen Durchmesser zu. Das chemische Potenzial von Silan ist viel höher als das von Siliziumchlorid, welches herkömmlicherweise verwendet wird (in Fig. 7 durch eine unterbrochene Linie gezeigt), und daher ist es für das Wachstum von Silizium-Quantendrähten 13 vorteilhaft. Aus dem vorstehend beschriebenen Grund wachsen in dieser Ausführungsform Silizium-Quantendrähte 13, selbst wenn die geschmolzenen Legierungströpfchen 12a einen kleinen Durchmesser haben.

[0068] Ferner wird die Heiztemperatur des Siliziumsubstrats 11 auf 400°C oder weniger und der Druck des siliziumhaltigen Gases auf 66,66 Pa (0,5 Torr) oder mehr eingestellt, weil der Durchmesser der gebildeten Silizium-Quantendrähte kleiner wird, wenn die Heiztemperatur niedriger wird und der Druck des siliziumhaltigen Gases größer wird, und Silizium-Quantendrähte 13, deren Durchmesser kleiner als 20 nm ist, können gewachsen werden, wenn die Heiztemperatur 400°C oder weniger ist und der Druck des siliziumhaltigen Gases 66,66 Pa (0,5 Torr) oder mehr ist.

[0069] Wie vorstehend beschrieben, wird bei dem Herstellungsverfahren gemäß dieser Ausführungsform Aufheizen bei einer Temperatur von 400°C oder weniger in einer Atmosphäre durchgeführt, die bei einem Druck von 66,66 Pa (0,5 Torr) oder mehr ein siliziumhaltiges Gas enthält, dessen Änderung der Gibbs'schen freien Energie der Zersetzungsreaktion bei 400°C oder weniger einen negativen Wert annehmen kann. Daher können Silizium-Quantendrähte 13, deren Durchmesser kleiner als 20 nm ist, bei einer niedrigen Temperatur gewachsen werden; d. h., Silizium-Quantendrähte 13, die ausreichend schmal bzw. eng sind, um neuartige physikalische Eigenschaften bereitzustellen, können direkt gewachsen werden.

[0070] Ferner können bei diesem Verfahren zur Herstellung eines Quantendrahts, da die Metallschicht 12 bei einer Dicke von 5 nm oder weniger aufgedampft wird, kleine geschmolzenen Legierungströpfchen 12a gebildet werden, was wiederum das Wachstum von Silizium-Quantendrähten mit einem ausreichend kleinen Durchmesser zulässt.

[0071] Ein spezielles Beispiel der zweiten Ausführungsform wird nachstehend unter Bezugnahme auf die Zeichnungen beschrieben.

[0072] Zuerst wurde ein polierter n-Typ Silizium-Wafer ((111-)Oberfläche, $\rho = 0,4 \Omega \cdot \text{cm}$) hergestellt und in rechteckige Siliziumsubstrate 11 (1 cm \times 5 cm) geschnitten. Nachdem die Siliziumsubstrate 11 in Aceton gereinigt waren, wurden sie mit einer gemischten Lösung aus Salpetersäure (HNO_3) und Flusssäure (HF) geätzt, wobei ein Oxid von ihren Oberflächen entfernt wurde (siehe Fig. 2A).

[0073] Dann wurde jedes Siliziumsubstrat 11 in eine Reaktionskammer (nicht gezeigt) eingebracht, und der Druck innerhalb der Reaktionskammer wurde auf $6,666 \times 10^{-6}$ Pa (5×10^{-6} Torr) reduziert. Danach wurde Gold unter Verwendung eines Wolfram-(W-)Glüh- bzw. -Heizfadens auf die Oberfläche des Siliziumsubstrats aufgedampft, so dass eine 0,6 nm dicke Metallschicht 12 gebildet wurde (siehe Fig. 2B).

[0074] Dann wurde, nachdem das Siliziumsubstrat 11 erhitzt war, ein Silangas, das mit einem Helium (He)-Gas auf 10% verdünnt war, in die Reaktionskammer (nicht gezeigt) als ein siliziumhaltiges Gas eingeleitet, während die Substrattemperatur aufrechterhalten wurde. Als Ergebnis wurde eine Vielzahl von geschmolzenen Legierungströpfchen 12a auf der Oberfläche des Siliziumsubstrats 11 gebildet, das Silangas wurde in den entsprechenden geschmolzenen Legierungströpfchen 12a nach Formel (1) zersetzt, und eine Vielzahl von Silizium-Quantendrähten 13 wuchs (siehe Fig. 2C und Fig. 2D).



[0075] In dem vorstehenden Schritt war die Flussrate des Gasgemisches, das das Silangas enthält, auf 40 sccm eingestellt, und der Partialdruck des Silangases wurde in einem Bereich von 1,33 Pa bis 133,32 Pa (0,1 bis 1 Torr) variiert. Das Erhitzen wurde durchgeführt, indem man einen Gleichstrom durch das Siliziumsubstrat 11 entlang seiner Längsachse fließen ließ, und die Heiztemperatur wurde in einem Bereich von 320°C bis 440°C variiert. Die Temperatur des Siliziumsubstrats 11 wurde mit einer optischen Vorrichtung zur Messung hoher Temperaturen und einem Thermoelement gemessen.

[0076] So gewachsene Silizium-Quantendrähte 13 wurden mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) betrachtet. Fig. 8 zeigt die Untersuchungsergebnisse. Fig. 8 zeigt eine Beziehung zwischen Silangas-Partialdruck/Heiztemperatur und der Form/Dicke des Silizium-Quantendrahts 13.

[0077] Wie in Fig. 8 zu sehen ist, hatte der Silizium-Quantendraht 13 einen kleineren Durchmesser, wenn die Heiztemperatur niedriger und der Silan-Gasdruck höher war. Während der Durchmesser 20 nm war, wenn die Heiztemperatur 440°C und der Silan-Gasdruck 66,66 Pa (0,5 Torr) war, war er nur noch 15 nm klein, wenn diese Werte 320°C und

133,2 Pa (1 Torr) betragen. Es hat sich gezeigt, dass der Durchmesser des Silizium-Quantendrahts 13 kleiner als 20 nm gemacht werden kann, wenn die Heiztemperatur 400°C oder weniger ist, und der Silan-Gasdruck 66,66 Pa (0,5 Torr) oder mehr ist.

[0078] Obwohl die Erfindung vorstehend unter Verwendung der Ausführungsform und des Beispiels beschrieben worden ist, ist die Erfindung nicht auf diese beschränkt, und zahlreiche Modifikationen sind möglich. Beispielsweise können, obwohl in der vorstehenden Ausführungsform und dem vorstehend beschriebenen Beispiel die geschmolzenen Legierungströpfchen 12a durch Erhitzen des Siliziumsubstrats 11 nach dem Aufdampfen des Metalls auf dem Silizium-Substrat und vor dem Einleiten des siliziumhaltigen Gases gebildet werden, geschmolzene Legierungströpfchen 12a durch Erhitzen des Siliziumsubstrats 11, nachdem ein Metall auf das Siliziumsubstrat 11 aufgedampft worden ist, in einer Atmosphäre, die ein siliziumhaltiges Gas enthält gebildet werden. Als eine weitere Alternative kann ein Metall aufgedampft werden, während das Siliziumsubstrat 11 erhitzt wird, wobei in diesem Fall geschmolzene Legierungströpfchen 12a während des Aufdampfens gebildet werden.

[0079] Ferner kann, obwohl in dem vorstehend beschriebenen Beispiel das siliziumhaltige Gas (Silangas) in die Reaktionskammer eingeleitet wird, so dass es mit einem Heliumgas verdünnt wird, es mit einem anderen Inertgas, wie beispielsweise Argon-(Ar-)Gas verdünnt werden, oder nur das siliziumhaltige Gas kann eingeleitet werden, ohne dass es verdünnt wird.

[0080] Weiterhin können, obwohl das vorstehende Beispiel nur auf den Fall gerichtet ist, bei dem ein Silangas als siliziumhaltiges Gas verwendet wird, dieselben Ergebnisse erzielt werden, selbst in einem Fall, in dem ein Disilangas oder ein Trisilangas verwendet wird.

[0081] Wie vorstehend beschrieben, wird bei dem Herstellungsverfahren gemäß der zweiten Ausführungsform Erhitzen auf eine Temperatur von 400°C oder weniger in einer Atmosphäre, die bei einem Druck von 66,66 Pa (0,5 Torr) oder mehr ein siliziumhaltiges Gas enthält, dessen Veränderung der Gibbs'schen freien Energie für eine Zersetzungsreaktion bei 400°C oder weniger ein negativer Wert sein kann, durchgeführt. Daher können Silizium-Quantendrähte, deren Durchmesser kleiner als 20 nm ist, bei einer niedrigen Temperatur gewachsen werden. Somit wird der Vorteil erzielt, dass Silizium-Quantendrähte, die ausreichend schmal bzw. eng sind, um neue physikalische Eigenschaften bereitzustellen, direkt gewachsen werden.

Ausführungsform 3

[0082] Eine dritte Ausführungsform der Erfindung wird nachstehend im Detail unter Bezugnahme auf die Zeichnungen beschrieben.

[0083] Fig. 9 zeigt die Anordnung einer Vorrichtung mit Drähten gemäß der dritten Ausführungsform. Die Vorrichtung hat eine Vielzahl von Silizium-Einkristall-drähten 2, die auf einem einkristallinen Siliziumsubstrat 1 gebildet sind, so dass sie annähernd senkrecht zu dem Substrat 1 sind. Die Herstellungspositionen der entsprechenden Drähte 2 sind so gesteuert, dass sie periodisch angeordnet sind. In der in Fig. 9 gezeigten Vorrichtung sind die Drähte 2 bei regelmäßigen Abständen in sowohl longitudinaler als auch lateraler Richtung angeordnet.

[0084] Die Dicken der entsprechenden Drähte 2 sind gesteuert. In der Vorrichtung von Fig. 9 erhalten die Drähte 2 dieselben Dicken. Wie in Fig. 10 gezeigt, können die Drähte 2 verschiedene Dicken erhalten. Beispielsweise kann, wenn diese Vorrichtung als eine lichtemittierende Vorrichtung unter Verwendung der optischen Eigenschaften der Drähte 2 zu verwenden ist, Licht mit einer einzelnen Wellenlänge emittiert werden, indem man die Dicken der entsprechenden Drähte 2 wie in Fig. 9 gezeigt gleich macht. Wenn die Dicken der entsprechenden Drähte 2 geeignet variiert werden, wie in Fig. 10 gezeigt, kann eine einzelne Vorrichtung Lichtstrahlen mit einer Vielzahl von Wellenlängen emittieren. In der Vorrichtung von Fig. 10 werden die Dicken der entsprechenden Drähte 2 Spalte für Spalte geändert, wobei Lichtstrahlen mit drei Arten von Wellenformen bzw. Wellenlängen emittiert werden. Beispielsweise emittieren die dicksten Drähte 2 mit einem Durchmesser von 3 nm (30 Å), die Drähte 2 mit mittlerer Dicke mit einem Durchmesser von 2 nm (20 Å) und die schmalsten Drähte 2 mit einem Durchmesser von ungefähr 1 nm (10 Å) jeweils rotes, grünes und blaues Licht.

[0085] Ferner kann, wie in Fig. 11 gezeigt, diese Vorrichtung in einer flachen Anzeigevorrichtung mit Selbst-Emission als eine Feldvorrichtung, in der Verbindungsleitungen mit den Drähten 2 in Matrixform verbunden sind, verwendet werden. In der Vorrichtung von Fig. 11 ist eine Vielzahl von Verbindungsleitungen 1a mit einem Leitfähigkeitstyp (n oder p), der dem Leitfähigkeitstyp (p oder n) eines Substrats 1 entgegengesetzt ist, auf den Oberflächen des Substrats 1 gebildet, und Drähte 2 sind auf den Verbindungsleitungen 1a gebildet. Ein isolierender Film 3 aus Siliziumdioxid (SiO_2) oder einem geeigneten Harz ist zwischen den Drähten 2 gebildet. Eine Vielzahl von Kontaktleitungen 4 ist mit einem geeigneten Metall auf den Drähten 2 in der Richtung senkrecht zu den Verbindungsleitungen 1a gebildet. Somit sind in dieser Vorrichtung die Drähte 2 einzeln verbunden.

[0086] Wie vorstehend beschrieben, können in der Vorrichtung mit Drähten gemäß dieser Ausführungsform, da die Herstellungspositionen der entsprechenden Drähte 2 gesteuert werden, die entsprechenden Drähte 2 an vorgegebenen Positionen, die für den beabsichtigten Gebrauch ausgelegt sind, angeordnet sein; die Vorrichtung kann praktisch verwendet werden. Beispielsweise kann eine Feldvorrichtung vom Matrixtyp erhalten werden, bei dem die Drähte 2 periodisch angeordnet sind.

[0087] Ferner können, da die Dicken der entsprechenden Drähte 2 gesteuert werden, die Dicken der entsprechenden Drähte 2 auf beliebige vorgegebene Werte gemäß einem beabsichtigten Zweck eingestellt werden. Daher werden eine Vorrichtung mit Drähten 2 mit gleichförmiger Dicke und eine Vorrichtung, in der Drähte 2 mit verschiedenen Dicken angeordnet sind und die daher sichtbare Lichtstrahlen mit einer Vielzahl von Wellenlängen emittieren kann, bereitgestellt.

[0088] Die Vorrichtung mit dem vorstehend beschriebenen Aufbau kann in der folgenden Weise hergestellt werden.

[0089] Die Fig. 12A bis Fig. 12C und Fig. 13A bis Fig. 13D zeigen Schritte zur Herstellung der Vorrichtung gemäß dieser Ausführungsform. Die Fig. 12A bis Fig. 12C und Fig. 13A bis Fig. 13D zeigen Schritte zur Herstellung der Vorrichtung, die in Fig. 10 als typisches Beispiel gezeigt ist. Zuerst wird, wie in Fig. 12A gezeigt, ein einkristallines (111)-Siliziumsubstrat 1 mit einer Resistivität von 0,4 bis $\Omega\text{-cm}$ beispielsweise in einen Reaktionsofen eingeschoben und darin oxidiert, so dass ein Oxidfilm mit einer Dicke von beispielsweise 100 nm als ein Herstellungshilfsfilm 11 auf der Oberfläche des Substrats 1 gebildet wird.

[0090] Dann wird, wie in Fig. 12B gezeigt, nachdem ein Fotoresist-Film 12 auf das Substrat, auf dem der Herstellungshilfsfilm 11 gebildet ist, aufgebracht worden ist, dieser selektiv belichtet, und Öffnungen 12a mit geeigneten Größen werden an Positionen gebildet, die den Herstellungspositionen der Drähte 2 entsprechen. Beispielsweise werden zur Bildung der Vorrichtung von Fig. 10 Öffnungen 12a₁ mit einem Durchmesser von ungefähr 1 μm , Öffnungen 12a₂ mit einem Durchmesser von ungefähr 0,8 μm und Öffnungen 12a₃ mit einem Durchmesser von ungefähr 0,6 μm für die entsprechenden Spalten an Positionen mit regelmäßigen Abständen in sowohl longitudinaler als auch lateraler Richtung gebildet.

[0091] Darauf folgend wird das Substrat 1 in eine geeignete Größe (beispielsweise ein Rechteck mit 1 cm \times 4,5 cm) geschnitten. Danach wird, wie in Fig. 12C gezeigt, der Herstellungshilfsfilm eine geeignete Zeit lang mit einer Ätzflüssigkeit, die Fluss-

säure (HF) enthält, geätzt (beispielsweise 5 Minuten), wobei der Fotoresist-Film 12 als eine Maske verwendet wird, und eine Vielzahl von Löchern 11a werden dadurch in dem Herstellungs-Hilfsfilm 11 an den entsprechenden Herstellungspositionen der jeweiligen Drähte 2 gebildet. Beispielsweise werden in dem Fall der Herstellung der in **Fig. 10** gezeigten Vorrichtung Löcher 11a₁ mit einem Durchmesser von ungefähr 1 µm, Löcher 11a₂ mit einem Durchmesser von ungefähr 0,8 µm und Löcher 11a₃ mit einem Durchmesser von ungefähr 0,6 µm für die entsprechenden Spalten gebildet. Als Ergebnis wird der Herstellungs-Hilfsfilm 11 als ein Hilfsmittel gebildet, in dem die Löcher 11a gebildet werden, so dass sie den Herstellungspositionen der entsprechenden Drähte 2 entsprechen (die vorstehenden Schritte gehören zu dem Schritt zur Bildung eines Herstellungs-Hilfsfilms und einem Schritt zur Bildung eines Hilfsmittels). Es wird festgestellt, dass, wenn somit gebildeten Löcher 11a zu groß sind, die Dicken und die Herstellungspositionen der Drähte 2 nicht mit einer hohen Genauigkeit gesteuert werden können.

[0092] Nachdem die Löcher 11a in dem Herstellungs-Hilfsfilm 11 gebildet sind, wird der Fotoresist-film 12 beispielsweise mit Aceton entfernt. Danach wird das Substrat 1 in Salpetersäure (HNO₃), die auf 70°C erhitzt worden ist, beispielsweise 1 Minute lang eingetaucht und dann 5 Sekunden mit einer Ätzflüssigkeit, die Flusssäure enthält, geätzt, so dass die Bereiche der Oberfläche des Substrats 1, die durch die Löcher 11a des Herstellungs-Hilfsfilms 11 freigelegt sind, gereinigt werden.

[0093] Nach der Reinigung des Substrats 1 wird es getrocknet und dann in einen Reaktionsofen (nicht gezeigt) eingeschoben. Nachdem der Druck innerhalb des Reaktionsofens reduziert worden ist, wird das Substrat 1 geeignet erhitzt (auf beispielsweise 700°C) und ein Metall (beispielsweise Gold (Au)), das während der Bildung der Drähte 2 als ein Katalysator dient, wird auf das Substrat 1 wie in **Fig. 13A** (Aufdampfschritt) gezeigt, aufgedampft. Als ein Ergebnis werden 3 nm dicke Katalysatorschichten 13 auf den Bereichen des Substrats 1 gebildet, die durch die entsprechenden Löcher 11a des Herstellungs-Hilfsfilms 11 freigelegt sind. Kein Metall wird auf dem Herstellungs-Hilfsfilm 11 aufgedampft und daher werden darauf keine Katalysatorschichten 13 gebildet. In diesem Fall wird beispielsweise das Substrat 1 erhitzt, indem man einen Gleichstrom durch das Substrat 1 entlang seiner Längsrichtung fließen lässt. Das Metall wird eine Minute lang unter Verwendung von beispielsweise einem Wolfram-(W-)Glüh- bzw. -Heizfaden verdampft.

[0094] Nach der Bildung der Katalysatorschichten 13 wird das Substrat 1 in der Reaktionskammer (nicht gezeigt) eine geeignete Zeit lang (beispielsweise 30 Minuten) auf einer geeignet hohen Temperatur (bei-

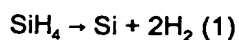
spielsweise bei 700°C) gehalten (Heizschritt). Als Ergebnis schmelzen die Katalysatorschichten 13, die durch die entsprechenden Löcher 11a des Herstellungs-Hilfsfilms 11 freigelegt sind, lokal Silizium an der Oberfläche des Substrats 1 und kleben aneinander bzw. hängen zusammen unter Bildung von geschmolzenen Legierungströpfchen wie in **Fig. 13B** gezeigt. Beispielsweise werden zur Herstellung der in **Fig. 10** gezeigten Vorrichtung geschmolzene Legierungströpfchen 13a₁ mit einem Durchmesser von ungefähr 100 nm (1000 Å) geschmolzene Legierungströpfchen 13a₂ mit einem Durchmesser von ungefähr 90 nm (900 Å) und geschmolzene Legierungströpfchen 13a₃ mit einer Dicke von ungefähr 80 nm (800 Å) entsprechend den Größen der zugehörigen Löcher des Herstellungs-Hilfsfilms 11 gebildet.

[0095] Das heißt, die Größen der entsprechenden geschmolzenen Legierungströpfchen 13a werden durch die Größen der zugehörigen Löcher 11a des Herstellungs-Hilfsfilms gesteuert. Ferner hängt die Größe der entsprechenden geschmolzenen Legierungströpfchen 13a von der Dicke der Katalysatorschichten 13, die in dem Aufdampfschritt aufgedampft werden, ab. Beispielsweise nehmen die Größen der jeweiligen geschmolzenen Legierungströpfchen 13a ab, wenn die Katalysatorschichten 13 dünner gemacht werden und umgekehrt.

[0096] Der Heizschritt wird eine geeignete Zeit lang durchgeführt, bis in jedem Loch 11a ein einzelnes entsprechendes geschmolzenes Legierungströpfchen 13a gebildet ist. Obwohl diese Zeit von den Größen der entsprechenden Löcher 11a des Herstellungs-Hilfsfilms 11 und der Heiztemperatur abhängt, ist es bevorzugt, dass der Heizschritt mindestens 10 Minuten lang durchgeführt wird.

[0097] Nachdem die entsprechenden geschmolzenen Legierungströpfchen 13a in der vorstehend beschriebenen Weise gebildet sind, wird ein Silan-(SiH₄-)Gas als ein siliziumhaltiges Gas zur Bildung der Drähte 2 in den Reaktionsofen (nicht gezeigt) eingeleitet, während das Substrat 1 auf 450°C oder mehr (beispielsweise 700°C) erhitzt wird (Drahtwachstumsschritt). Die Menge des Silangases wird so eingestellt, dass der Partialdruck des Silangases in dem Reaktionsofen weniger als 66,66 Pa (0,5 Torr), vorzugsweise 20 Pa (0,15 Torr) oder weniger wird.

[0098] Als ein Ergebnis wird das Silangas durch eine Zersetzungsreaktion gemäß Formel (1) zersetzt, wobei die entsprechenden geschmolzenen Legierungströpfchen 13a als Katalysatoren wirken.



[0099] Silizium, das durch die Zersetzung des Silangases hergestellt worden ist, diffundiert in die jeweili-

gen geschmolzenen Legierungströpfchen 13a und bindet sich epitaxial an die Grenzflächen zwischen dem Substrat 1 und den entsprechenden geschmolzenen Legierungströpfchen 13a. Daher wachsen, wie in **Fig. 13C** gezeigt, Drähte 2 selektiv unter den entsprechenden geschmolzenen Legierungströpfchen 13a mit Dicken, die den Größen der entsprechenden geschmolzenen Legierungströpfchen 13a entsprechen. Das heißt, im Fall der Herstellung der Vorrichtung von **Fig. 10** wachsen Drähte 2, mit einem Durchmesser von ungefähr 100 nm (1000 Å), Drähte 2₂ mit einem Durchmesser von ungefähr 90 nm (900 Å) und Drähte 2₃ mit einem Durchmesser von ungefähr 80 nm (800 Å).

[0100] Der Grund, warum ein Silangas als das siliziumhaltige Gas im Drahtwachstumsschritt verwendet wird, ist, dass ein Silangas das Wachstum von Drähten 2 mit einem gleichförmigen Dickenprofil in der Längsrichtung ebenso wie mit einem ausreichend kleinen Durchmesser zulässt. Ferner können durch Einstellen der Heiztemperatur des Siliziumsubstrats 1 und des Silangas-Partialdrucks auf 450°C oder mehr bzw. niedriger als 66,66 Pa (0,5 Torr) Drähte 2 mit einer guten Form erhalten werden.

[0101] Nachdem die Drähte 2 ungefähr 20 Minuten lang in der vorstehend beschriebenen Weise gewachsen worden sind, wird das Substrat eine Minute lang in beispielsweise Königswasser ($\text{HNO}_3 : \text{HCl} = 1 : 3$) bei 35°C eingetaucht, wobei die Legierungströpfchen 13 an den Spitzen der entsprechenden Drähte 2 und die Katalysatorschichten 13 auf dem Herstellungsfilm 11 geätzt und entfernt werden.

[0102] Danach wird, wie in **Fig. 13D** gezeigt, das Substrat, auf dem die Drähte 2 gewachsen sind, eine geeignete Zeit lang in einer Atmosphäre, die Sauerstoff-(O_2)-Gas bei 66.660 Pa (500 Torr) enthält, auf beispielsweise 700°C aufgeheizt (Oxidationsschritt). Als Ergebnis wird ein Oxidfilm 11b, der den Herstellungsfilm 11 enthält, auf den Oberflächen der Drähte 2 und dem Substrat 1 gebildet, so dass die Durchmesser der entsprechenden Drähte 2 um die Dicke des Oxidfilms 11b reduziert sind. Beispielsweise werden im Fall der Herstellung der Vorrichtung von **Fig. 10** die Durchmesser der Drähte 2₁, 2₂ bzw. 2₃ auf ungefähr 3 nm (30 Å), 2 nm (20 Å) bzw. 1 nm (10 Å) verringert, wodurch die Emission von Lichtstrahlen in Rot, Grün bzw. Blau ermöglicht wird.

[0103] Nachdem die Drähte 2 in der vorstehend beschriebenen Weise oxidiert worden sind, wird das Substrat 1, auf dem die Drähte 2 gebildet sind, ungefähr 1 Minute lang, wenn nötig, bei Raumtemperatur in Flusssäure eingetaucht, wodurch der Oxidfilm 11b (mit dem Herstellungsfilm 11) auf der Oberfläche der Drähte 2 und dem Substrat 1 entfernt wird. Als ein Ergebnis wird die Vorrichtung von **Fig. 10** gebildet.

[0104] In dem vorstehend beschriebenen Schritt können in einem Fall, in dem kein Problem auftritt, selbst wenn der isolierende Film 3 zwischen den Drähten 2 gebildet ist, wie im Fall von **Fig. 11**, oder der Oxidfilm 11b rund um die Drähte 2 gebildet ist, nur unnötige Bereiche des Oxidfilms 11b entfernt werden, und es ist nicht notwendig, den vollständigen Oxidfilm 11b zu entfernen.

[0105] In diesem Herstellungsverfahren wurde untersucht, wie die Größe des Lochs 11a des Herstellungsfilms 11 und der Heizschritt den Draht 2 beeinflussen. Ergebnisse dieses Experiments werden nachstehend beschrieben werden.

[0106] Zuerst wurde in derselben Weise wie vorstehend beschrieben ein Substrat 1 vorbereitet und ein Herstellungsfilm 11 gebildet. Der Herstellungsfilm 11 wurde mit einem Bereich, in dem eine Vielzahl von Löchern 11a mit einem Durchmesser von 1,5 µm gebildet waren, und einem Bereich, in dem eine Vielzahl von Löchern 11a mit einem Durchmesser von 3 µm gebildet waren, bereitgestellt. Danach wurde in derselben Weise wie vorstehend beschrieben Gold aufgedampft, dann wurden geschmolzene Legierungströpfchen 13a durch 30-minütiges Erhitzen gebildet und Drähte 2 gewachsen. Danach wurden die so gewachsenen Drähte 2 mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) betrachtet.

[0107] Es wurde beobachtet, dass in dem Bereich, in dem die Löcher 11a mit 1,5 µm-Durchmesser gebildet wurden, ein Draht 2 in jedem Loch 11a gebildet wurde, und die Dicken der entsprechenden Drähte 2 gleichförmig waren. Im Gegensatz wurden in dem Bereich, in dem die Löcher 11a mit einem Durchmesser von 3 µm gebildet wurden, in vielen Löchern zwei Drähte 2 gewachsen, und die Dicken der entsprechenden Drähte 2 waren nicht gleichförmig. Somit wird erkannt, dass, wenn die Löcher 11a des Herstellungsfilms 11 zu groß sind, die Herstellungspositionen und die Dicken der Drähte nicht gesteuert werden können.

[0108] Ferner wurde in derselben Weise wie vorstehend beschrieben, ein Substrat 1 hergestellt und ein Herstellungsfilm 11 gebildet, indem eine Vielzahl von Löchern 11a mit einem Durchmesser von 1,5 µm gebildet wurden. Danach wurde in derselben Weise wie vorstehend beschrieben Gold aufgedampft, dann wurden geschmolzene Legierungströpfchen 13a durch einminütiges Erhitzen gebildet, und dann wurden Drähte 2 gewachsen. Danach wurden die so gewachsenen Drähte 2 mit einem REM betrachtet.

[0109] Es wurde beobachtet, dass für jedes Loch 11a eine Vielzahl von Drähten 2 gewachsen wurden und die Dicken der entsprechenden Drähte 2 nicht gleichförmig waren. So ist erkennbar, dass, wenn die

Dauer des Heizschritts unzureichend ist, geschmolzene Legierungströpfchen 13a nicht ausreichend aneinander kleben bzw. zusammenhängen können und Drähte 2 so wachsen, wie in jedem Loch 11a eine Vielzahl von geschmolzenen Legierungströpfchen 13a vorliegen. Das heißt, die Herstellungspositionen und die Dicken der entsprechenden Drähte 2 kann nicht gesteuert werden.

[0110] Wie vorstehend beschrieben, können bei diesem Verfahren zur Herstellung einer Vorrichtung mit Drähten, da Gold durch den Herstellungs-Hilfsfilm 11 auf das Substrat 1 aufgedampft wird, die Herstellungsposition und die Dicke von jedem Draht 2 gemäß der Position und der Größe des zugehörigen Lochs 11a in dem Herstellungs-Hilfsfilm 11 gesteuert werden. Daher können die Drähte 2 mit einer hohen Genauigkeit bei geplanten Herstellungspositionen und Dicken gewachsen werden.

[0111] Ein geschmolzenes Legierungströpfchen 13a wird in jedem Loch 11a des Herstellungs-Hilfsfilms 11 durch Erhitzen für eine ausreichende Zeitdauer nach dem Aufdampfschritt und vor dem Drahtwachstumsschritt gebildet. Daher kann für jedes Loch 11a ein Draht 2 gewachsen werden, und die Herstellungspositionen und die Dicken der entsprechenden Drähte 2 können mit einer hohen Genauigkeit gesteuert werden.

[0112] Ferner können, da die gewachsenen Drähte 2 nach dem Drahtwachstumsschritt oxidiert werden, Drähte 2 mit ausreichend kleinen Durchmessern mit hoher Genauigkeit gebildet werden.

[0113] Die Vorrichtung gemäß der dritten Ausführungsform kann auch in der folgenden Weise hergestellt werden.

[0114] Die Fig. 14A bis Fig. 14E und Fig. 15A bis Fig. 15C zeigen Herstellungsschritte eines weiteren Herstellungsverfahrens der Vorrichtung gemäß der Ausführungsform. Die Fig. 14A bis Fig. 14E und Fig. 15A bis Fig. 15C zeigen auch Schritte zur Herstellung der Vorrichtung, die in Fig. 10 als ein typisches Beispiel gezeigt ist. Zuerst wird, wie in Fig. 14A gezeigt, ein einkristallines (111)-Siliziumsubstrat 1 mit einer Resistivität von beispielsweise $0,4 \Omega \cdot \text{cm}$ in einen Reaktionsofen eingeschoben und darin oxidiert, so dass ein Oxidfilm mit beispielsweise ungefähr 100 nm Dicke als ein Positions-Steuerungsfilm 21 auf der (111)-Oberfläche des Substrats 1 gebildet wird.

[0115] Dann wird, wie in Fig. 14B gezeigt, der Positionssteuerungsfilm 21 selektiv und unter Verwendung von beispielsweise einer Ätzflüssigkeit, die Flußsäure enthält, geätzt, und dadurch werden Öffnungen 21a mit einer geeigneten Größe in einer geeigneten Weise (beispielsweise periodisch) gebildet

(Schritt zur Bildung des Positions-Steuerungsfilms). Beispielsweise werden in dem Fall der Herstellung der in Fig. 10 gezeigten Vorrichtung eine Vielzahl von Öffnungen 21a mit ungefähr $4 \mu\text{m}$ Durchmesser gebildet, so dass sie jeweils einen konstanten Mittelpunkt-Mittelpunkt-Abstand von ungefähr $6 \mu\text{m}$ in sowohl longitudinaler als auch lateraler Richtung haben, wie in einer Draufsicht von Fig. 16 gezeigt.

[0116] Darauf folgend wird, wie in Fig. 14C gezeigt, die Oberfläche des Substrats 1 selektiv unter Verwendung des Positions-Steuerungsfilms 21 als eine Maske durch Plasmaätzen unter Verwendung von beispielsweise Schwefelhexafluorid (SF_6) geätzt. Die Ätzbedingungen können so eingestellt werden, dass die Ausgangsleistung 22,5 W, der Druck 21.33 Pa (160 mTorr) und die Ätzzeit eine Minute ist. Als Ergebnis wird in der Oberfläche des Substrats 1 eine Vielzahl von periodisch angeordneten Vertiefungen 1b gebildet, beispielsweise so, dass sie den entsprechenden Öffnungen 21a des Positions-Steuerungsfilms 21 entsprechen (Vertiefungsbildungsschritt). Beispielsweise werden eine Vielzahl von kreisförmigen Vertiefungen 1b mit derselben Größe bei gleichmäßigen Abständen in sowohl longitudinaler als auch lateraler Richtung gebildet.

[0117] Nach der Bildung der Vertiefungen 1b wird der Positions-Steuerungsfilm 21 durch Ätzen unter Verwendung von beispielsweise einer Ätzflüssigkeit, die Flußsäure enthält, entfernt. Dann wird die Oberfläche des Substrats 1 bei 80°C unter Verwendung von beispielsweise einer Ätzflüssigkeit, die Kaliumhydroxid (KOH) enthält, geätzt. Als Ergebnis erfolgt, wie durch die Pfeile in Fig. 14D angegeben, das Ätzen selektiv an den Seitenflächen der jeweiligen Vertiefungen 1b. Das liegt daran, dass die Ätzrate des Silizium-Einkristalls von der Kristalloberfläche abhängt; die Ätzrate der (111)-Oberfläche ist sehr gering, während die Ätzrate der (-100)-Oberfläche, der (00-1)-Oberfläche und der (0-10)-Oberflächen, die den Seitenflächen der Vertiefungen 1b entsprechen, relativ hoch sind. Obwohl ein negativer Index der entsprechenden Richtung zum Bezeichnen einer Kristalloberfläche üblicherweise überstrichen wird, wird dieser hier aus Gründen der Einfachheit durch ein vorangestelltes Minuszeichen angegeben.

[0118] Daher werden, wenn das Ätzen weiter voranschreitet (beispielsweise nach einem Ablauf von 30 Sekunden), eine Vielzahl von hervorstehenden Bereichen 1c an Bereichen (beispielsweise durch unterbrochene Linien in Fig. 16 angegeben) zwischen den Vertiefungen 1b wie in Fig. 14E gezeigt erzeugt. Das Ätzen wird an einem Zeitpunkt gestoppt, an dem die hervorstehenden Bereiche 1c mit einer geeigneten Größe auf der Oberfläche des Substrats 1 in dieser Weise gebildet sind (Schritt zur Herstellung von hervorstehenden Bereichen). Die entsprechenden hervorstehenden Bereiche 1c werden in einem späteren

Schritt als Mittel zur Bestimmung der Position (d. h. Hilfsmittel) dienen, die Keime zur Bildung der Drähte 2 werden und ihre Positionen bestimmen. Bei diesem Herstellungsverfahren werden die Größe und die Positionen der Öffnungen 21a, die in dem Schritt zur Herstellung des Positions-Steuerungsfilms gebildet werden, so eingestellt, dass die hervorstehenden Bereiche 1c so gebildet werden, dass sie den Herstellungspositionen der entsprechenden Drähte 2 entsprechen. Die vorstehend beschriebenen Schritte von dem Schritt zur Herstellung des Positions-Steuerungsfilms zu dem Schritt zur Herstellung der hervorstehenden Bereiche gehören zu einem Schritt zur Herstellung der Positions-Bestimmungsmittel (d. h. Schritt zur Herstellung eines Hilfsmittels). Übrigens umfasst in diesem Herstellungsverfahren, da ein Schritt zur Herstellung eines Herstellungs-Hilfsfilms nach dem Schritt zur Bildung eines Positions-Bestimmungsmittels, wie nachstehend beschrieben, durchgeführt wird, der Schritt zur Bildung eines Hilfsmittels den Schritt zur Herstellung eines Positions-Bestimmungsmittels und den Schritt zur Bildung eines Herstellungs-Hilfsfilms.

[0119] Nach der Herstellung der hervorstehenden Bereiche 1c wird, wie in Fig. 15A gezeigt, ein Siliziumdioxidfilm mit ungefähr 25 nm Dicke als ein Herstellungs-Hilfsfilm 11 auf dem Substrat 1 beispielsweise durch CVD (Abscheidung aus der Gasphase) gebildet. Danach wird durch selektives Ätzen des Herstellungs-Hilfsfilms 11 in derselben Weise wie in dem Schritt zur Herstellung des Herstellungs-Hilfsfilms in dem vorhergehenden Herstellungsverfahren eine Vielzahl von Löchern 11a so gebildet, dass sie den entsprechenden hervorstehenden Bereichen 1c entsprechen. Beispielsweise werden in dem Fall der Herstellung der in Fig. 10 gezeigten Vorrichtung Löcher 11a₁ mit einem Durchmesser von ungefähr 1 µm, Löcher 11a₂ mit einem Durchmesser von ungefähr 0,8 µm und Löcher 11a₃ mit einem Durchmesser von ungefähr 0,6 µm für die entsprechenden Spalten in derselben Weise wie bei dem früheren Herstellungsverfahren gebildet. Als Ergebnis wird der Herstellungs-Hilfsfilm 11 als ein Hilfsmittel gebildet (Schritt zur Bildung des Herstellungs-Hilfsfilms, Schritt zur Herstellung des Hilfsmittels). Bei diesem Schritt ist es nicht notwendig, dass die hervorstehenden Bereiche 1c sich in den Mittelpunkten der entsprechenden Löcher 11c befinden; es ist ausreichend, dass die hervorstehenden Bereiche 1c auf der Oberfläche freigelegt sind, so dass sie 1 : 1 den jeweiligen Löchern 11a entsprechen.

[0120] Nach der Bildung des Herstellungs-Hilfsfilms 11 werden die Bereiche des Substrats 1, die durch die entsprechenden Löcher des Herstellungs-Hilfsfilms 11 freigelegt sind, gereinigt und getrocknet, und die entsprechenden Katalysatorschichten 13 werden auf den freigelegten Bereichen des Substrats 1 durch Aufdampfen eines Metalls, das als ein Katalysator

während dem Wachstum der Drähte 2 dient, in derselben Weise wie bei dem früheren Herstellungsverfahren aufgedampft (Aufdampfschritt). Derselbe Heizschritt wie bei dem früheren Herstellungsverfahren wird ungefähr gleichzeitig mit dem Aufdampfschritt oder wenn notwendig durchgeführt. Als Ergebnis schmelzen, wie in Fig. 15B gezeigt, die Katalysatorschichten 13 auf den Bereichen des Substrats 1, die durch die entsprechenden Löcher 11a des Herstellungs-Hilfsfilms 11 freigelegt sind, lokal Silizium und hängen zusammen bzw. kleben aneinander, wobei die entsprechenden Bereiche 1c als Keime dienen, und eine Vielzahl von geschmolzenen Legierungströpfchen 13a wird an den Positionen der entsprechenden hervorstehenden Bereiche 1c gebildet. Zu diesem Zeitpunkt werden die Größen der geschmolzenen Legierungströpfchen 13a durch die entsprechenden Löcher 11a des Herstellungs-Hilfsfilms 11 gesteuert. Zu diesem Zeitpunkt können, selbst wenn die Positionen der hervorstehenden Bereiche 1c von den Mittelpunkten der entsprechenden Löcher 11a abweichen, die geschmolzene Legierungströpfchen 13a zuverlässig an den Positionen der entsprechenden hervorstehenden Bereiche 11c gebildet werden, da die geschmolzenen Legierungströpfchen 13a zusammenhängen bzw. aneinander kleben, wobei die entsprechenden hervorstehenden Bereiche 1c als Keime dienen.

[0121] Nach der Herstellung der geschmolzenen Legierungströpfchen 13a werden, wie in Fig. 15C gezeigt, Drähte 2 selektiv unter den geschmolzenen Legierungströpfchen in derselben Weise wie bei dem früheren Herstellungsverfahren gewachsen (Drahtwachstumsschritt). Das heißt, die Drähte 2 wachsen an den Positionen der entsprechenden hervorstehenden Bereiche 1c. Somit wird die in Fig. 10 gezeigte Vorrichtung gebildet.

[0122] Wenn notwendig, kann ein Oxidationsschritt nach dem Wachstum der Drähte 2 in derselben Weise wie bei dem früheren Herstellungsverfahren durchgeführt werden.

[0123] Fig. 17 ist eine REM-Fotografie einer Vorrichtung, die durch dieses Herstellungsverfahren gebildet worden ist. Übrigens wurde die Figur von Fig. 17 so gebildet, dass die Öffnungen 21a des Positions-Steuerungsfilms 21 als Kreise mit derselben Größe bei regelmäßigen Abständen in sowohl longitudinaler als auch lateraler Richtung gebildet wurden, und dass die Löcher 11a des Herstellungs-Hilfsfilms 11 auch als Kreise mit derselben Größe gebildet wurden. Wie aus dieser Figur zu sehen ist, wurden die Drähte 2 gewachsen, einer für jedes Loch 11a, ungefähr an derselben Position in den entsprechenden Löchern 11a des Herstellungs-Hilfsfilms 11, und ihre Dicken waren gleichförmig. Übrigens zeigt ein Vergleich mit einer Vorrichtung, die durch das frühere Herstellungsverfahren hergestellt worden ist, dass

durch dieses Herstellungsverfahren sogar die Position der Drähte in den entsprechenden Löchern 11a des Herstellungs-Hilfsfilms 11 gesteuert werden kann und somit eine genauere Steuerung bereitgestellt wird.

[0124] Bei diesem Verfahren zur Herstellung einer Vorrichtung mit Drähten können, da die hervorstehenden Bereiche 1c als die Mittel zur Bestimmung der Position auf dem Substrat 1 gebildet werden, die geschmolzenen Legierungströpfchen 13a an den Positionen der entsprechenden hervorstehenden Bereiche 1c gebildet werden, indem man die Katalysatorschichten 13 mit den entsprechenden hervorstehenden Bereichen 1c, die als Keime dienen, zusammenhängen bzw. aneinanderkleben lässt. Das heißt, die entsprechenden Drähte 2 können an geplanten Herstellungspositionen mit hoher Genauigkeit gebildet werden.

[0125] Ferner können, da ein Metall als ein Katalysator durch den Herstellungs-Hilfsfilm 11 nach der Bildung der hervorstehenden Bereiche 1c als ein Katalysator aufgedampft wird, die Dicken der Drähte 2 entsprechend den Größen der jeweiligen Löcher 11a des Herstellungs-Hilfsfilms 11 gesteuert werden. Somit können die entsprechenden Drähte 2 mit geplanten Dicken mit einer hohen Genauigkeit gebildet werden.

[0126] Die Erfindung ist nicht auf die vorstehend beschriebene Ausführungsform beschränkt, und zahlreiche Modifikationen sind möglich. Beispielsweise umfasst, obwohl in der Ausführungsform die Drähte 2 bei regelmäßigen Abständen in sowohl longitudinaler als auch lateraler Richtung angeordnet sind, die Erfindung den Fall, in dem die Drähte 2 bei vorgegebenen Abständen entsprechend der Verwendung der Vorrichtung angeordnet sind. Sogar in diesem Fall kann die Vorrichtung in derselben Weise wie in der Ausführungsform hergestellt werden.

[0127] Obwohl in der Ausführungsform der Herstellungs-Hilfsfilm 11 mit Siliziumdioxid gebildet wird, kann er mit anderen Substanzen, wie beispielsweise Siliziumnitrid (SiN_4) und geeigneten Harzen gebildet werden, solange sie nicht geschmolzene Legierungströpfchen mit dem Metall, das in dem Aufdampfschritt aufgedampft wird, bilden.

[0128] Obwohl in der Ausführungsform der Positions-Steuerungsfilm 21 mit Siliziumdioxid gebildet wird, kann er mit anderen Substanzen, wie beispielsweise einem geeigneten Harz gebildet werden.

[0129] Obwohl in der vorstehenden Ausführungsform die hervorstehenden Bereiche 1c als Positions-Bestimmungsmittel auf der Oberfläche des Substrats 1 gebildet werden, können die Positions-Bestimmungsmittel jedes Mittel sein, solange sie als

Keime dienen, so dass die geschmolzenen Legierungströpfchen 13a an beabsichtigten Positionen aneinander kleben bzw. zusammenhängen, ebenso wie sie als Keime während der Bildung der Drähte 2 dienen können. Beispielsweise können sie winzige Gräben oder Vertiefungen sein, jeweils mit einer einzelnen tiefsten Position. Die hervorstehenden Bereiche 1c, wie in der Ausführungsform beschrieben, die durch Ätzen der Oberfläche des Substrats 1 gebildet werden, sind jedoch bevorzugt, da sie als Keime während dem Zusammenhängen bzw. Aneinanderkleben der geschmolzenen Legierungströpfchen 13a ebenso wie als Keime während dem epitaxialen Wachstum der Drähte 2 dienen.

[0130] Ferner kann, obwohl in der Ausführungsform in dem Drahtwachstumsschritt ein Silangas direkt in den Reaktionsofen (nicht gezeigt) eingeleitet wird, es in den Reaktionsofen eingeleitet werden, nachdem es mit einem Inertgas, wie beispielsweise einem Helium (He)-Gas oder einem Argon-(Ar)-Gas verdünnt worden ist.

[0131] Zusätzlich kann, obwohl in der Ausführungsform Silangas als das siliziumhaltige Gas verwendet wird, ein Disilan- (Si_2H_6) -Gas oder ein Trisilan- (Si_3H_8) -Gas oder sogar ein Gasgemisch aus mindestens einem der Gase Silangas, Disilangas und Trisilangas anstelle eines Silangases verwendet werden. Selbst mit solch einem Gas außer einem Silangas, können Siliziumdrähte mit ausreichend kleinen Durchmessern und guten Formen unter denselben Bedingungen wie mit einem Silangas gewachsen werden.

[0132] Ferner können nicht nur ein Silangas, ein Disilangas und ein Trisilangas, sondern auch Gase, mit der Eigenschaft, Silizium durch eine Zersetzungsreaktion zu bilden, wie beispielsweise Siliziumchlorid- (SiCl_4) -Gas, das mit einem Wasserstoffgas (H_2) verdünnt ist, als das siliziumhaltige Gas verwendet werden. In diesem Fall werden der Gasdruck und die Heiztemperatur geeignet für die Art des verwendeten Gases bestimmt.

[0133] Zusätzlich ist, obwohl die Ausführungsform auf den Fall des Wachstums von Siliziumdrähten auf dem Siliziumdraht 1 gerichtet ist, die Erfindung breit auf Vorrichtungen anwendbar, bei denen Drähte auf einem Substrat durch das VLS-Verfahren gewachsen werden.

[0134] Ferner kann, obwohl sich die Ausführungsform auf den Fall bezieht, in dem die Vorrichtung gemäß der Erfindung als eine lichtemittierende Vorrichtung oder als eine Feldvorrichtung verwendet wird, bei der eine Verdrahtung in Matrixform durchgeführt worden ist, sie als eine Nadel eines AFM (Kraftmikroskop) oder einer elektronenemittierenden Vorrichtung verwendet werden.

[0135] Wie vorstehend beschrieben, können in einer Vorrichtung mit Drähten gemäß der Erfindung, da die Herstellungspositionen der entsprechenden Drähte gesteuert werden, die entsprechenden Drähte an Positionen angeordnet werden, die für einen beabsichtigten Gebrauch ausgelegt sind, was zu dem Vorteil führt, dass die Vorrichtung praktisch verwendet werden kann. Beispielsweise kann eine matrixartige Feldvorrichtung erhalten werden, in der Drähte periodisch angeordnet sind.

[0136] Ferner kann in einer weiteren Vorrichtung mit Drähten gemäß der Erfindung, da die Dicken der entsprechenden Drähte gesteuert werden, der Vorteil erzielt werden, dass die Dicken der entsprechenden Drähte beliebig entsprechend einem beabsichtigten Verwendungszweck eingestellt werden können. Daher kann eine Vorrichtung erhalten werden, in der die Dicken der entsprechenden Drähte gleich gemacht sind, und eine Vorrichtung, in der Drähte mit verschiedenen Dicken angeordnet sind, wobei sichtbare Lichtstrahlen mit einer Vielzahl von Wellenlängen emittiert werden.

[0137] Ferner können bei dem Verfahren zur Herstellung einer Vorrichtung mit Drähten gemäß der Erfindung, da die Hilfsmittel zum Unterstützen der Bildung der Drähte auf einem Substrat gebildet werden, die Herstellungspositionen und die Dicken der entsprechenden Drähte gesteuert werden, indem die Hilfsmittel ausgenutzt werden. Das führt zu dem Vorteil, dass die Drähte mit hoher Genauigkeit gewachsen werden können. Somit kann die Vorrichtung mit Drähten gemäß der Erfindung verwirklicht werden.

Patentansprüche

1. Herstellungsverfahren eines Drahts, mit den Schritten:
Bilden einer Maske (11) mit einer Öffnung auf einem Substrat (1);
Abscheiden eines Metalls auf dem Substrat (1), auf dem die Maske (11) gebildet ist, durch Aufdampfen, wobei das Metall während des Wachstums eines Drahts ein Katalysator (13) wird; und
Wachsen eines Drahts (2) in der Öffnung auf dem Substrat (1) durch Erhitzen des Substrats (1), auf dem das Metall abgeschieden ist, in einer Atmosphäre, die ein Materialgas für den Draht (2) enthält, wobei eine Oberfläche des Substrats (1) als ein Keim für das Wachstum des Drahts (2) in der Öffnung der Maske (11) wirkt,
dadurch gekennzeichnet, daß
der Keim durch die Schritte zum Bilden einer Vielzahl von Vertiefungen (1b) auf der Oberfläche des Substrats (1) und zum Bilden eines hervorstehenden Bereichs (1c) zwischen benachbarten Vertiefungen von der Vielzahl von Vertiefungen (1b) durch selektives Ätzen der Seitenflächen der Vertiefungen (1b) gebildet wird.

2. Herstellungsverfahren nach Anspruch 1, bei dem die Maske (11) eine Vielzahl von periodisch gebildeten Öffnungen hat.

3. Herstellungsverfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem die Öffnung eine Größe hat, die einem Durchmesser eines zu wachsenden Drahts (2) entspricht.

4. Herstellungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, ferner mit einem Schritt zum Erhitzen des Substrats (1), auf das das Metall aufgedampft ist, vor dem Schritt zum Wachsen des Drahts.

5. Herstellungsverfahren nach Anspruch 4, bei dem eine Heizzeit in dem Substraterhitzungsschritt 10 Minuten oder mehr beträgt.

6. Herstellungsverfahren nach Anspruch 4, bei dem bei dem Substraterhitzungsschritt das Substrat (1) erhitzt wird, bis mindestens ein Legierungströpfchen aus dem Metall und einer Substanz, aus der das Substrat (1) aufgebaut ist, in der Öffnung gebildet wird.

7. Herstellungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, bei dem sowohl das Substrat als auch der Draht aus Silizium hergestellt sind.

8. Herstellungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, bei dem das Materialgas Silangas, Disilangas und/oder Trisilangas ist.

9. Herstellungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, bei dem das Substrat (1) ein Siliziumsubstrat mit einer (111)-Oberfläche ist.

10. Herstellungsverfahren nach Anspruch 7, mit den Schritten zum Oxidieren des gewachsenen Siliziumdrahts unter Bildung eines Oxidfilms in einem Oberflächenbereich; Entfernen des Metalls an einer Spitze des Siliziumdrahts; und Entfernen des Oxidfilms.

11. Herstellungsverfahren nach Anspruch 10, bei dem das Metall in dem Metallabscheidungsschritt bei einer Dicke von 5 nm oder weniger abgeschieden wird.

12. Herstellungsverfahren nach Anspruch 10 oder 11, bei dem das Metall Gold, Silber und/oder Indium ist.

13. Herstellungsverfahren nach Anspruch 12, bei dem das Siliziumsubstrat (1) in dem Schritt zum Wachsen des Siliziumdrahts auf 400°C oder weniger in einer Atmosphäre, die das siliziumhaltige Gas bei 66,66 Pa (0,5 Torr) oder mehr enthält, erhitzt wird.

FIG. 1

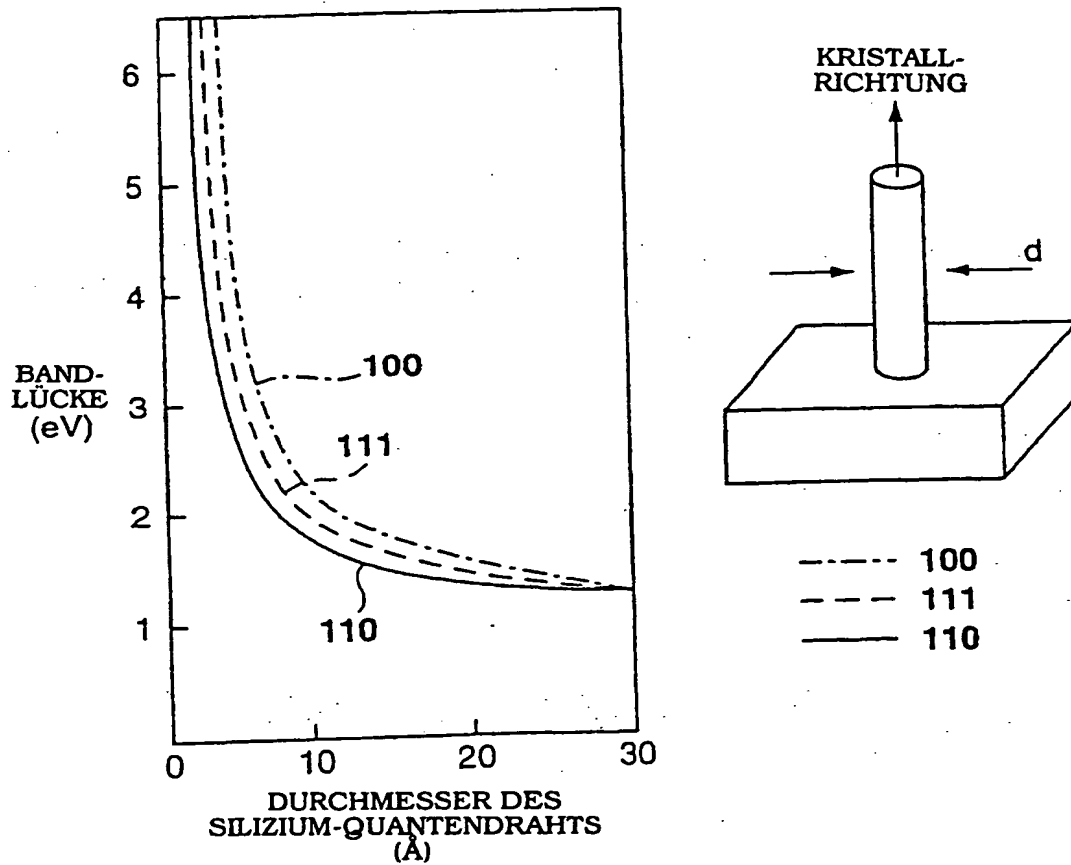


FIG. 2A

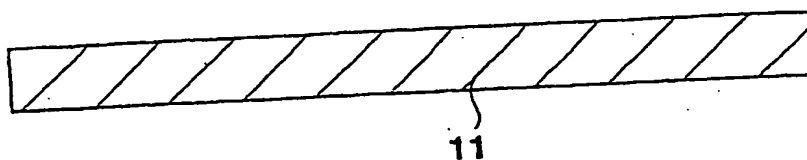


FIG. 2B

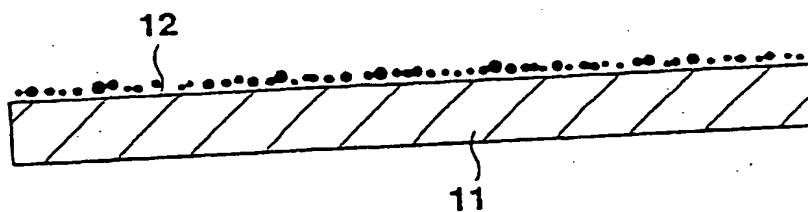


FIG. 2C

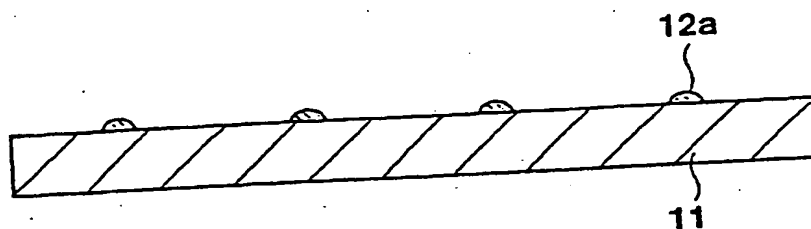


FIG. 2D

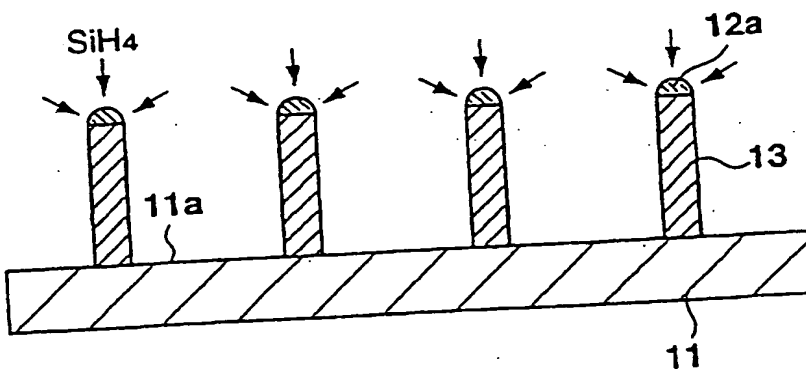


FIG. 3A

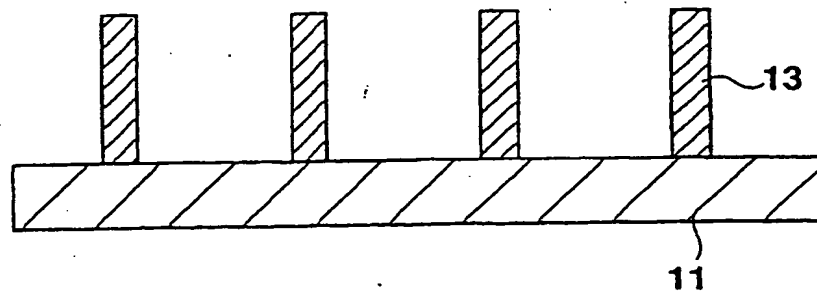


FIG. 3B

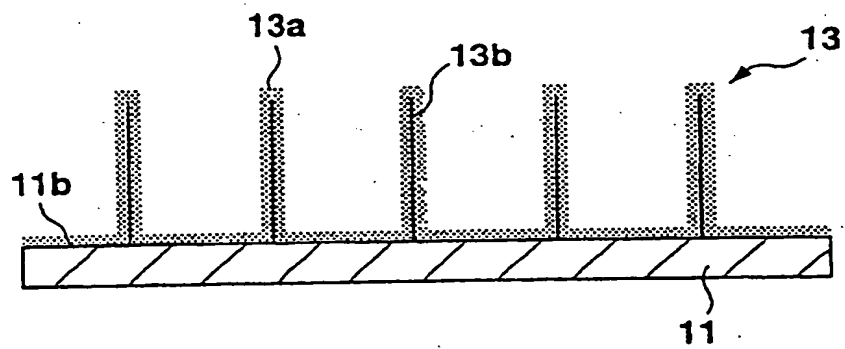


FIG. 3C

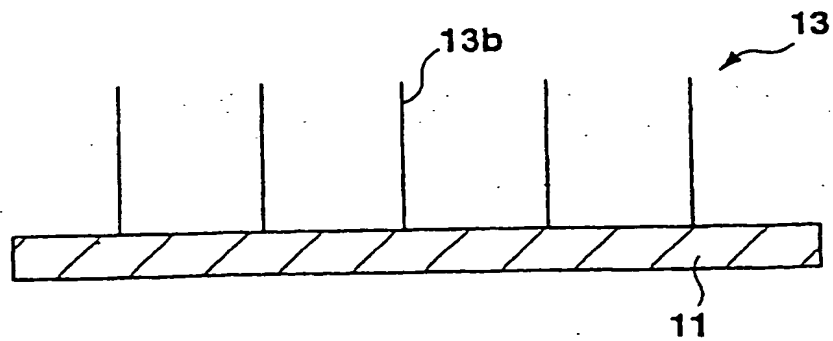
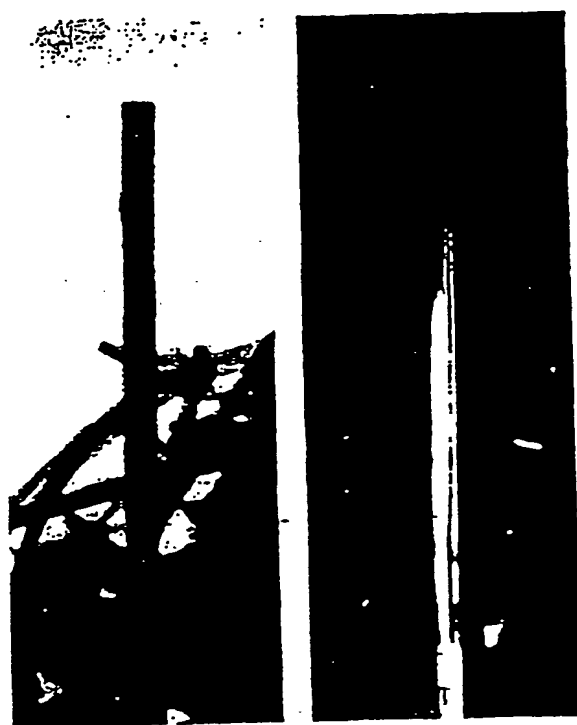


FIG. 4



FIG. 5A **FIG. 5B**



50nm

FIG. 6

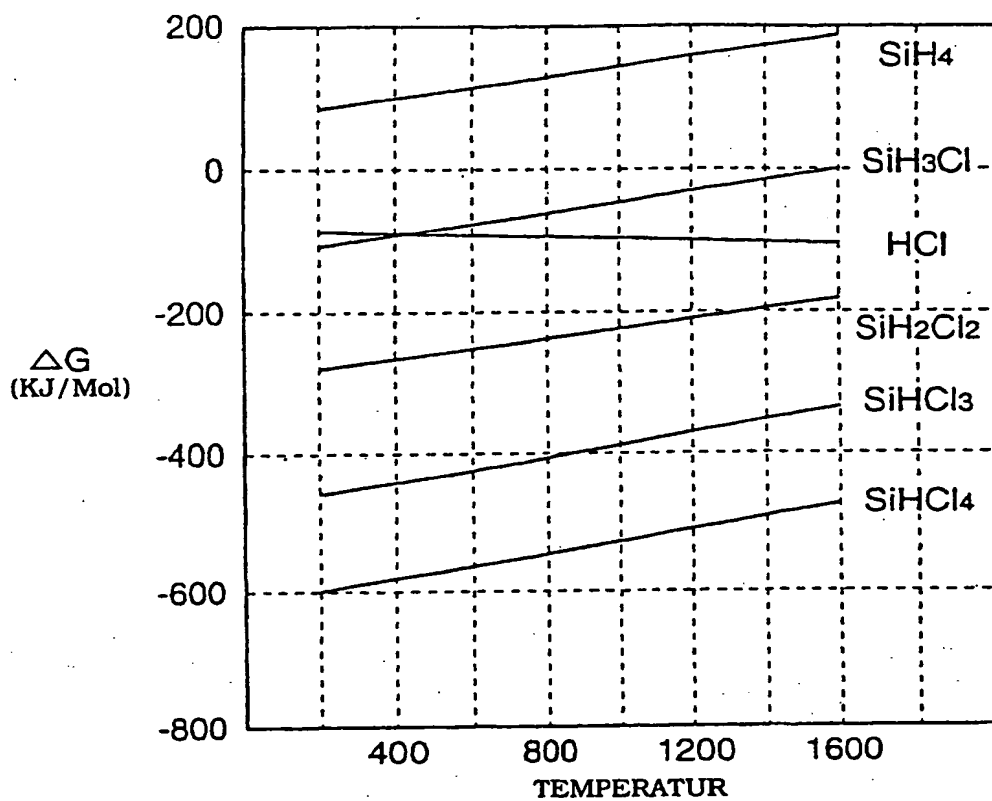


FIG. 7

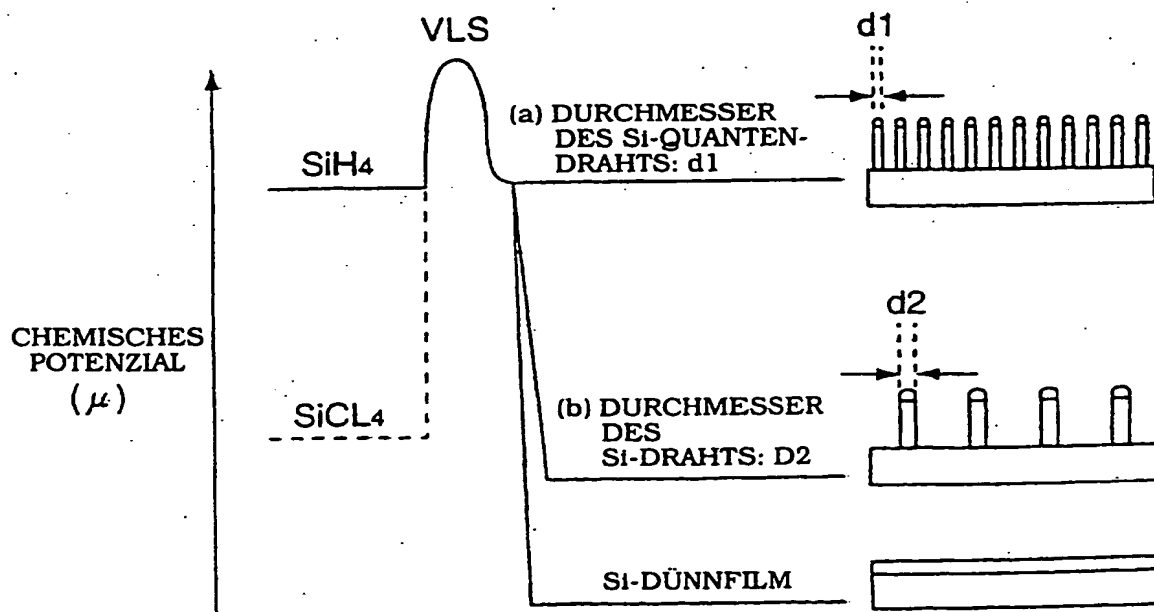


FIG. 8

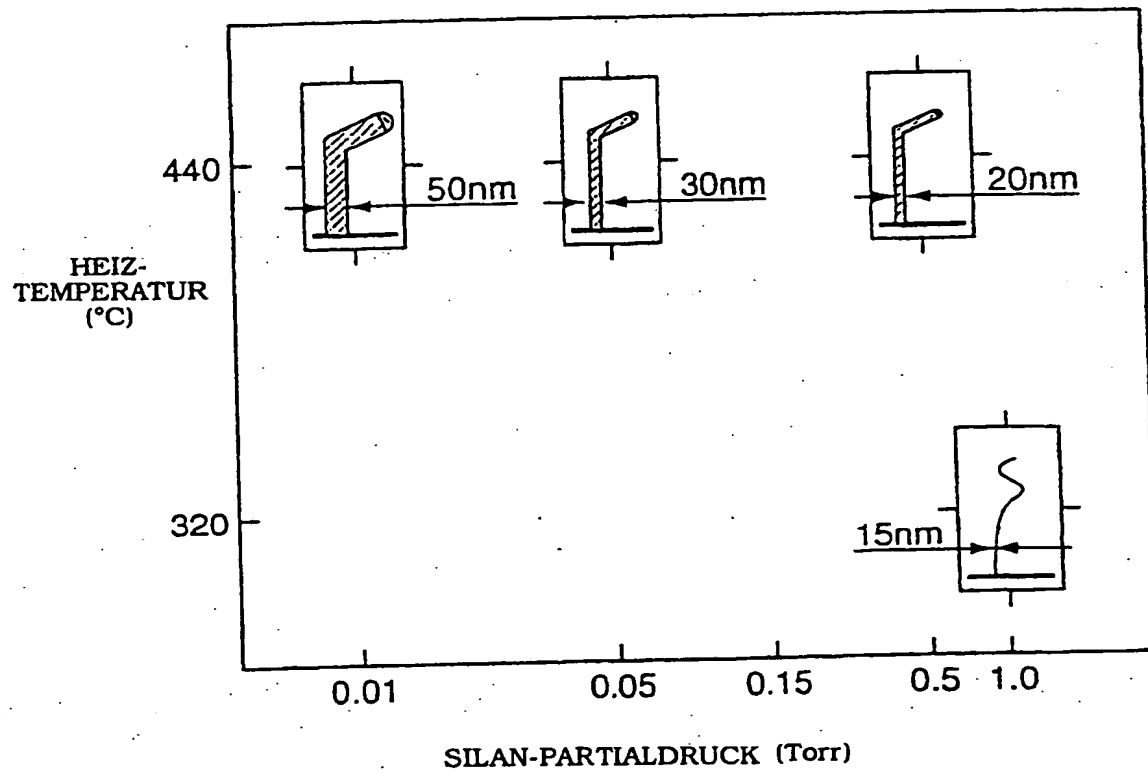


FIG. 9

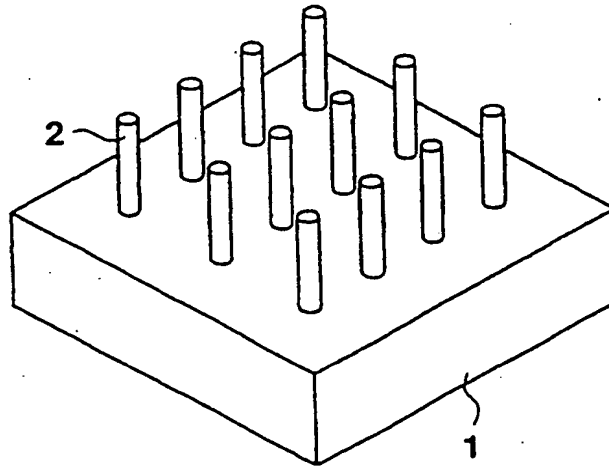


FIG. 10

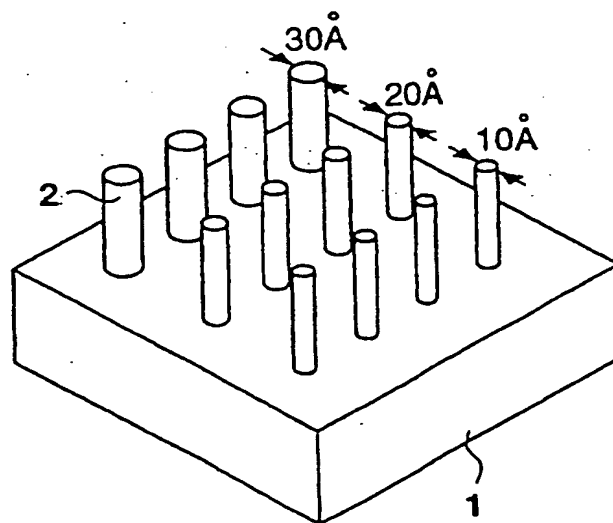


FIG. 11

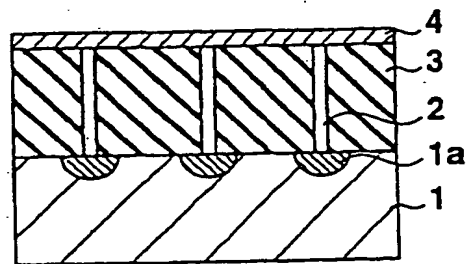


FIG. 12A

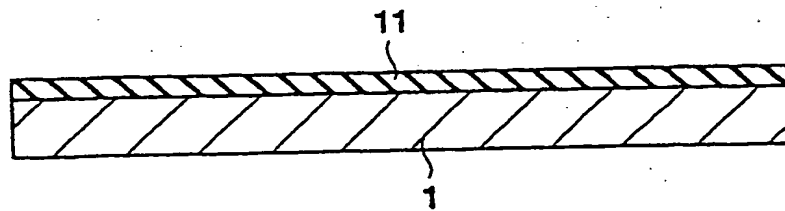


FIG. 12B

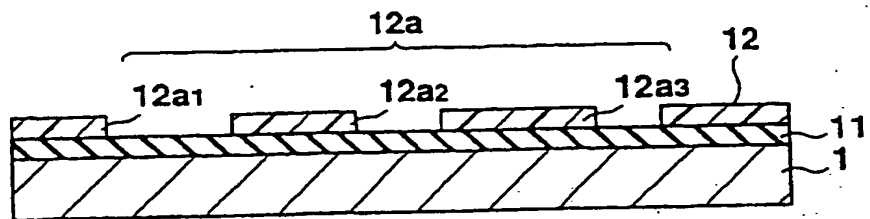


FIG. 12C

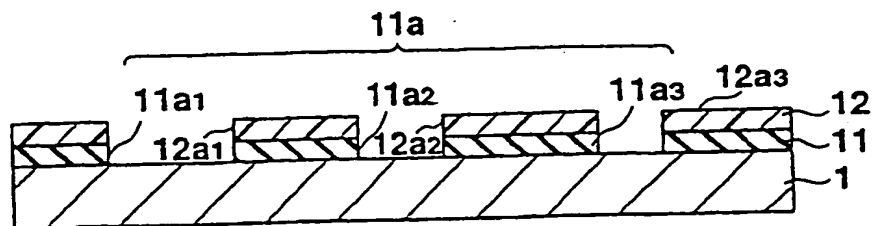


FIG. 13A

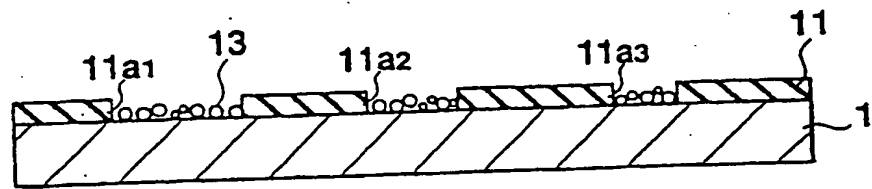


FIG. 13B

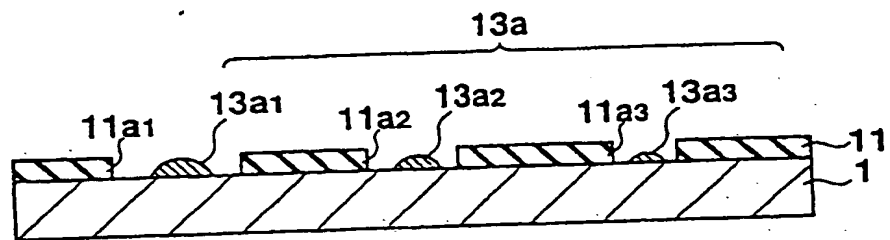


FIG. 13C

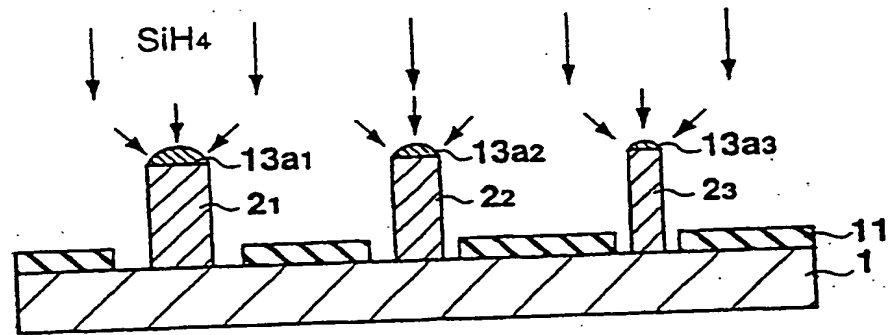


FIG. 13D

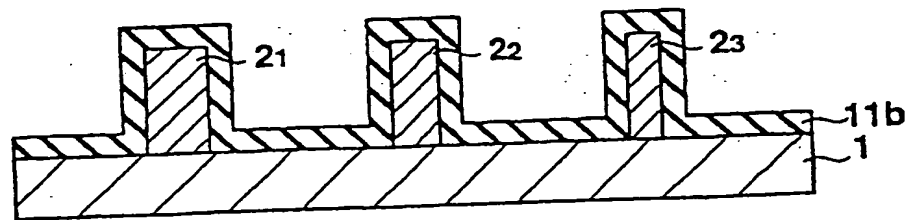


FIG. 14A

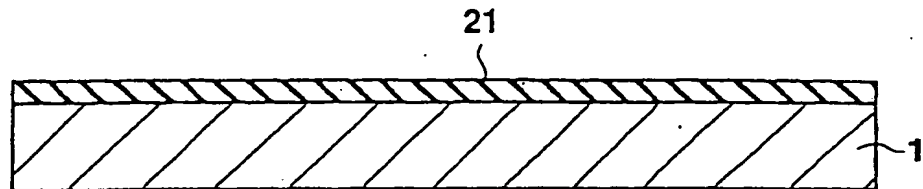


FIG. 14B

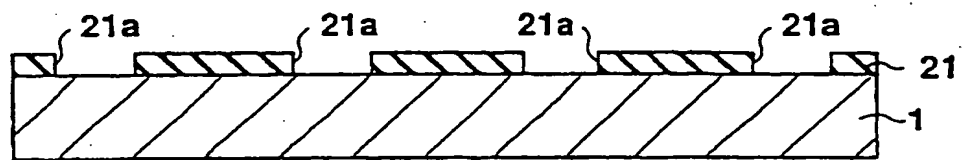


FIG. 14C

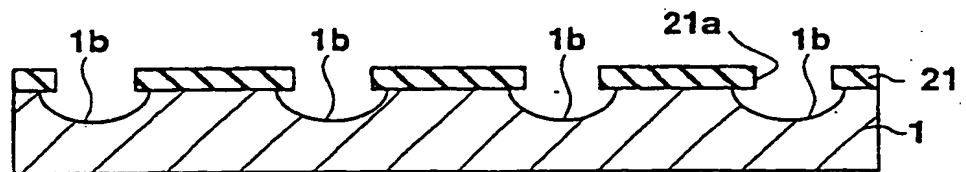


FIG. 14D

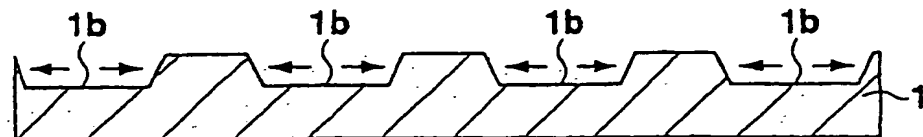
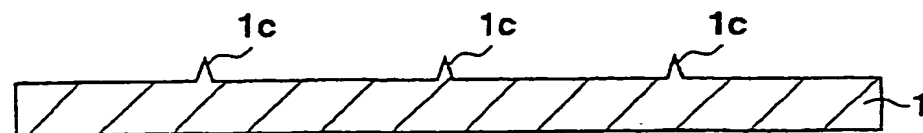


FIG. 14E



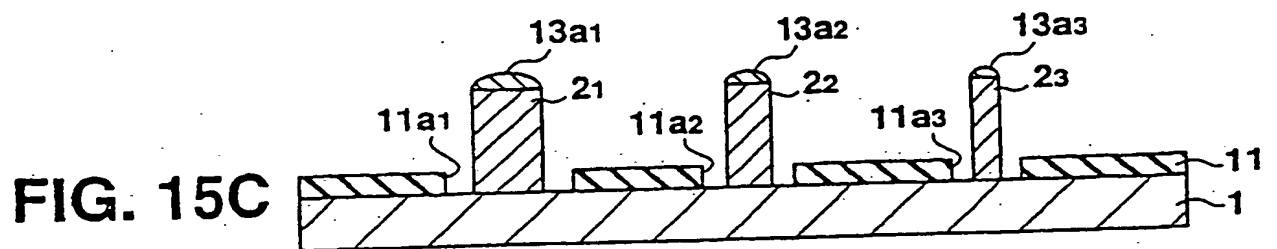
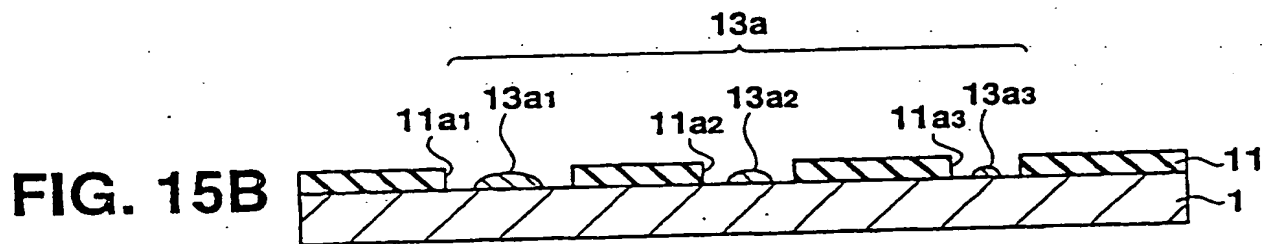
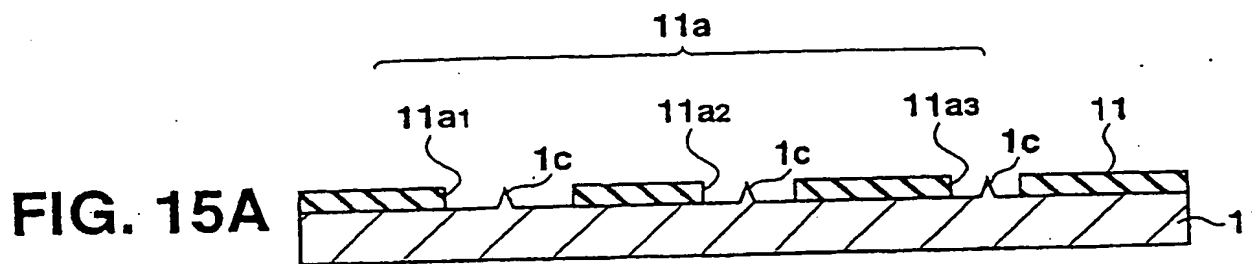


FIG. 16

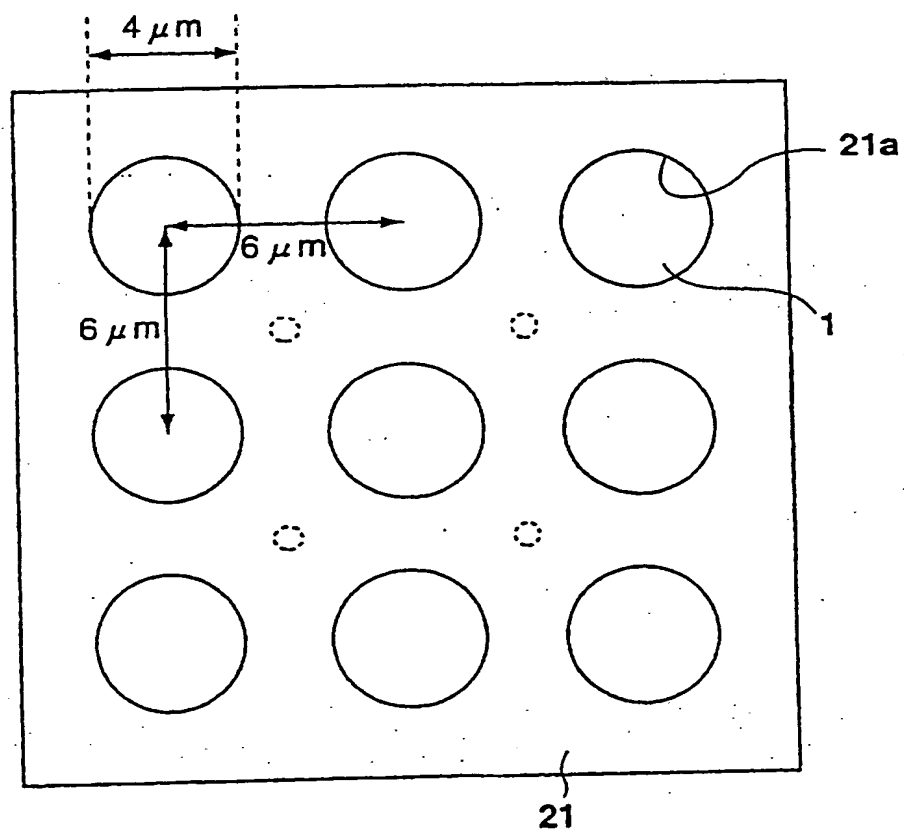
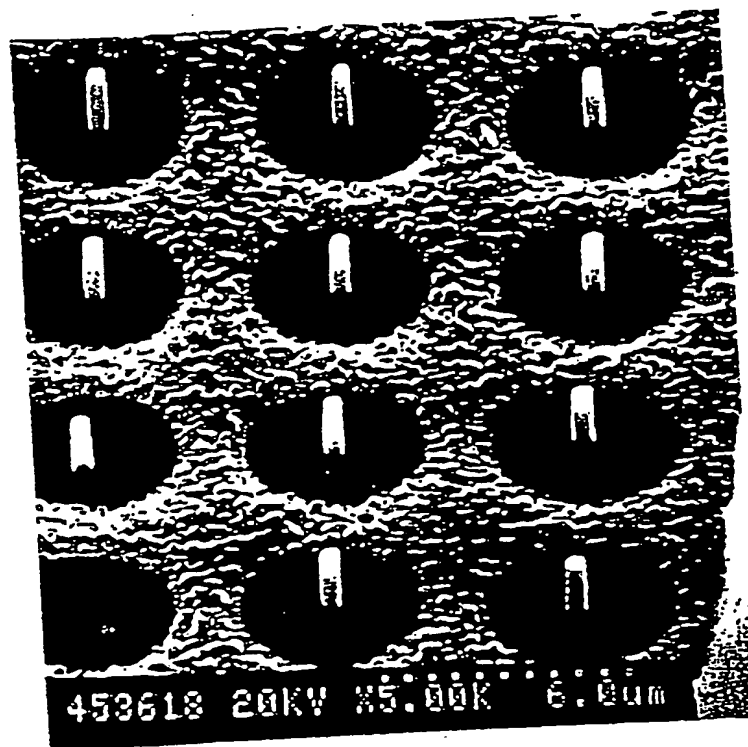


FIG. 17



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☒ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☒ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.